

Definição de perímetros de proteção de captações de água subterrânea no sistema aquífero Quelo-Luanda – NW de Angola

Danila Evanilde Delgado Pereira Bravo

Mestrado em Geologia

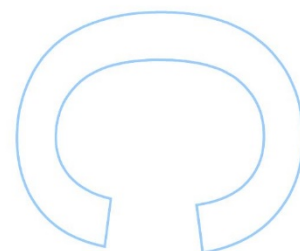
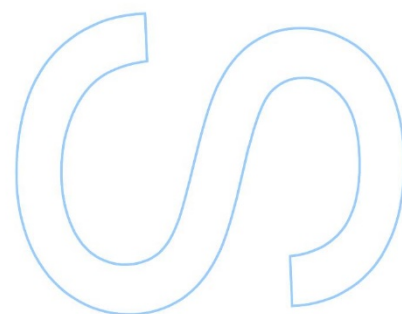
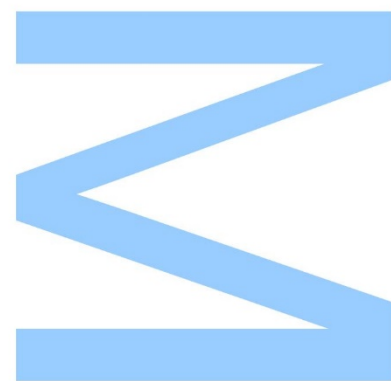
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2019

Orientador

Prof. Dr. Jorge Espinha Marques, Professor Associado, Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto

Coorientador

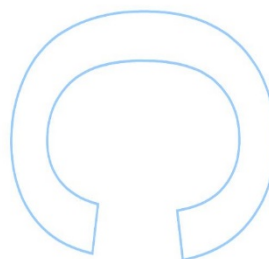
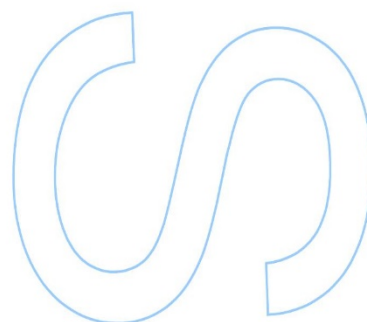
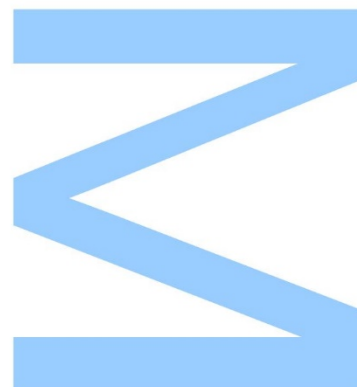
Prof. Dr. Gabriel Luís Miguel, Professor Associado, Faculdade de Ciências da
Universidade Agostinho Neto



Todas as correções determinadas
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

Primeiramente a Deus Soberano, porque sem ele nada seria, agradeço pelo dom da vida, por todas coisas que tem feito. Quão grande és tu Senhor.

Ao meu orientador Prof. Doutor Jorge Espinha Marques por ter aceite esse desafio, por todo o apoio prestado para esclarecer as minhas dúvidas e por não ter desistido desse trabalho quando tudo parecia que não daria certo.

A Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto – Angola por ter aberto as portas para a realização deste trabalho, em especial ao meu coorientador Prof. Doutor Gabriel Luís Miguel pela transmissão de conhecimentos, tempo disponibilizado, paciência muito obrigada.

Aos meus pais Teodoro Bravo e Paula Bravo por tudo o que têm feito, pelo amor incondicional. As minhas irmãs Danise Bravo, Daneille Bravo e Daneillyse Bravo, vocês são o meu maior suporte, quero que vocês tenham sempre orgulho de mim. Eu amo-vos de todo o coração.

Ao meu fiel companheiro Héliio Cristóvão, muito obrigada por toda ajuda prestada ao longo dessa trajetória, desde a Licenciatura até aqui, obrigada por tudo.

A família que Deus me deu, minha mãe Graciete Naval, minhas irmãs Dilma Naval, Daniela Naval e ao Fábio Rosa vocês foram os meus pilares.

Aos meus colegas do Mestrado da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Rodrivani Ferreira e Licínio Baptista, pelo companheirismo e troca de ideias, vocês foram incansáveis. Sem esquecer o Eng. Muteb Romang, a Prof. Maria João e o Zeleme Toko muito obrigada pela disponibilidade demonstrada ao longo desse período.

Aos meus colegas da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, obrigada pelo apoio ao longo desses anos.

Aos meus familiares e amigos, muito obrigada.

Resumo

O desenvolvimento da sociedade contemporânea tem vindo a trazer consequências em relação as alterações dos recursos hídricos como a contaminação das águas subterrâneas. Todavia há a necessidade de se definirem estratégias de proteção destes recursos. Esta proteção, encarada na perspetiva preventiva, no caso de aquíferos, envolve a delimitação dos perímetros de proteção.

As diferentes ocorrências dos sistemas aquíferos originam condições diversificadas nos modelos de fluxo subterrâneo que influenciam a entrada e percolação dos fluidos contaminantes. O conhecimento sobre essas informações é importante e necessário para a adequada delimitação de perímetros de proteção a qual, eventualmente, é feita de forma ineficaz, com fundamento científico escasso, o que torna a sua confiabilidade questionável.

No presente trabalho foram apresentados critérios e metodologias de avaliação de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição uma vez que essas características influenciam diretamente na determinação dos perímetros de proteção bem como a sua forma, tendo em vista a importância da preservação desse importante recurso hídrico para o meio ambiente e para o planeamento sócio-económico regional. Para tal, os métodos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade foram o índice DRASTIC e o índice GOD e para a delimitação do perímetro de proteção usou-se o método do Raio Fixo Calculado. O estudo abrangeu quatro furos de captação, localizados na bacia sedimentar do Cuanza. O tipo de aquífero presente nas áreas estudadas é do tipo poroso.

Pretende-se com a delimitação de perímetros de proteção diminuir o risco de contaminação da água dos aquíferos, e na ocorrência de um evento poluidor, que a água chegue às captações com concentrações consideradas aceitáveis e/ou que se consigam tomar medidas atempadas de correção.

Palavras-chave: Perímetros de proteção, Luanda, DRASTIC, Raio Fixo Calculado.

Abstract

The development of contemporary society has brought consequences in relation to the alterations in water resources such as contamination of groundwater and the need to define protection strategies for water resources. This protection should be carried out from a preventive perspective, in the case of aquifers, includes a delimitation of protection perimeters.

The different occurrences in the aquifers systems originate diverse conditions in the groundwater flow models, which then influence the entry and percolation of the contaminating fluids. The understanding of this information is important and necessary for the proper delimitation of protection areas, which eventually are conducted ineffectively, due to its scarce scientific knowledge, which then makes its reliability questionable.

This report presents criteria and methodologies for the assessment of groundwater vulnerability to pollution, since these characteristics directly influence the determination of the protection perimeters as well as their shape, therefore the importance of preserving this important water resource for the environment and for its regional socio-economic planning. For this, the methods used for the DRASTIC index and the GOD index and for the delimitation of the protection perimeter it was used the calculated fixed radius method. The study areas are represented by four wells. These wells are located in the Cuanza sedimentary basin. The type of aquifer present in the area is porous.

The delimitation of protection perimeters is intended to reduce the risk of water contamination of aquifers, and in the event of a polluting event, that the water reaches the abstractions with concentrations considered acceptable and/or timely remedial measures can be taken.

Keywords: Protection perimeters, Luanda, DRASTIC, Calculated Fixed Radius

Índice

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas	vii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1- Apresentação do tema	1
1.2- Tema da investigação.....	3
1.3- Objetivos	3
Capítulo 2 - Considerações hidrogeológicas na definição de perímetros de proteção.....	5
2.1- Águas subterrâneas.....	5
2.2- O ciclo hidrológico.....	6
2.3- Sistemas aquíferos	8
Capítulo 3 – Vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas	14
3.1- Fontes de poluição	14
3.2- Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas	17
3.3- Metodologias para a avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas	19
Capítulo 4- Perímetros de proteção das águas subterrâneas	27
4.1- Proteção das águas subterrâneas.....	27
4.2- Critérios	31
4.3- Metodologias	32
4.3.1- Métodos geométricos.....	33
4.3.1.1- Método do Raio Fixo Arbitrário	33
4.3.2- Métodos Analíticos e Numéricos Simplificados	34
4.3.2.1- Método baseado na lei de Darcy.....	34
4.3.2.3- Método da Equação do Fluxo Uniforme.....	41
4.3.2.4- Método da Equação do Equilíbrio de Thiem.....	43
4.3.2.5- Método da Equação de Hoffman e Lillich	44
4.3.2.6- Método de Wyssling	45
4.3.3- Métodos numéricos	49
Capítulo 5 – Enquadramento da área de estudo.....	50
5.1- Caracterização geográfica e ambiental	50
5.2- Clima	51
5.3- Vegetação.....	52

5.4- Solos	53
5.5- Geomorfologia	54
5.6- Enquadramento geológico regional e local	55
5.6.2- Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Cuanza	55
5.7- Enquadramento geológico local	58
5.8- Caracterização hidrogeológica	65
Capítulo 6- Caso de estudo	66
6.1- Área 1 – Estaleiro Central, Semente Viva	67
6.2- Área 2 – Zona Industrial de Viana, Semente Viva	69
6.4- Vulnerabilidade à poluição – aplicação do Índice DRASTIC	71
6.5- Vulnerabilidade à poluição – aplicação do Índice GOD	73
6.6- Perímetro de proteção - aplicação do método do Raio Fixo Calculado	73
Capítulo 7- Considerações Finais	78
Bibliografia	80
Anexos	87

Índice de Figuras

Figura 1- Distribuição da água no planeta (extraído de Fetter, 2001)	5
Figura 2- Ciclo hidrológico (MMA, 2007).	6
Figura 3- Zona não saturada e Zona saturada no subsolo (IGM, 2001)	8
Figura 4- Representação esquemática do subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade (adaptado de Bear & Verruit, 1987)	9
Figura 5- Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos (adaptado de Fitts, 2002).	10
Figura 6- Porosidade e Permeabilidade (IGM, 2001).	12
Figura 7- Circulação da água nos meios porosos, fraturados e cárlicos (Fonte APRH, 2001). ..	13
Figura 8- Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas (IGM, 2001).	15
Figura 9- Método DRASTIC - Greater Oliver Groundwater Vulnerability, (2011).	20
Figura 10- Sequência de passos usados no método GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al., 2006).	25
Figura 11- Desenho esquemático das zonas de proteção dos poços (adaptado de KRIGSMAN & Lobo Ferreira, 2001)	28
Figura 12- Definição de perímetro de proteção utilizando o método do raio fixo calculado (adaptado de Moinante, 2003).	37

Figura 13- Definição do perímetro de proteção utilizando a equação de fluxo uniforme (Fonte: Moinante, 2003).....	42
Figura 14- Determinação das isócronas por iteração (Fonte: Hoffman e Lillich, 1973).	45
Figura 15- Método de Wyssling (Adaptado de ITGE, 1991). Extraído de Sousa, 2011.	46
Figura 16- Exemplo de utilização de formas variáveis simplificadas (Fonte: EPA,1987).....	48
Figura 17- Localização geográfica da área de estudo.....	50
Figura 18- Clima da província de Luanda (extraído de Koppen-Geiger).	51
Figura 19- Vegetação da área de estudo (com enfoque para as palmeiras).	52
Figura 20- Solos "musseque".	53
Figura 21- Localização das bacias sedimentares contíguas a Angola (modificado de Hudec & Jackson, 2005).....	56
Figura 22- Margens conjugadas do Atlântico Sul, com bacias as conjugadas do Cuanza e de Santos representadas pelo círculo azul (Bryant et al., 2012).	57
Figura 23- Carta Geológica da bacia do Cuanza (Total e Sonangol/1968 – 1972).	59
Figura 24- Coluna litostratigráfica da Bacia do Cuanza, com base nos dados de Brognon & Verrier (1965), Stark (1991), Quesne et al. (2009) e Guiraud et al. (2010).	61
Figura 25- Aspectos da formação Quelo	64
Figura 26- Localização das captações.....	66
Figura 27- Poço 1 de água do Estaleiro Central, Semente Viva.....	68
Figura 28 - Poço 2 de água do Estaleiro Central, Semente Viva.....	68
Figura 29- Poço 3 de água da Zona Industrial de Viana.	69
Figura 30- Poço 4 de água do Bita Tanque.	71
Figura 31- Perímetro de proteção nos poços 1 e 2.....	76
Figura 32- Perímetro de proteção no poço 3.	76
Figura 33- Perímetro de proteção no poço 4.	77

Índice de Tabelas

Tabela 1- Os sete parâmetros do Índice DRASTIC	21
Tabela 2- O valor do índice e as classes de vulnerabilidade do Índice DRASTIC. (Adaptado pelo LNEC 2011)	23
Tabela 3- Classes de vulnerabilidade do aquífero segundo o método GOD. (Adaptada de Barboza et al., 2007 in de Souza, 2009).....	25
Tabela 4- Relação entre o raio dos perímetros de proteção com os tipos de aquífero (Fonte: Decreto-Lei 382/99).....	39
Tabela 5 - Valores de referência da porosidade eficaz. (Fonte: Decreto-Lei 382/99).	41
Tabela 6- Localização de do poço 1 e poço 2.	68
Tabela 7- Localização do poço 3.	70
Tabela 8- Localização do poço 4.	71
Tabela 9- Índice DRASTIC para a Área 1.	72
Tabela 10- Definição das Zonas Imediata, Intermédia e Alargada, segundo a equação 4.	75
Tabela 11- Definição das Zonas Imediata, Intermédia e Alargada.	75

Lista de Abreviaturas

AVI - Aquifer Vulnerability Index

DRASTIC - aquifer Depth, Recharge rate, Aquifer lithology, Soil type, Topography, Impact, aquifer hydraulic Conductivity

EPPNA - Equipa de Projeto do Plano Nacional da Água

ETA – Estação de Tratamento de Água

FCUAN – Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto

FCUP – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

GOD - Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater

INAMET – Instituto Nacional de Águas Meteorológica

IS - Susceptibility Index

SINTACS - Soggiacenza, Infiltrazione, Non saturo, Tipologia della copertura, Acquifero, Conducibilità, Superficie topográfica

Capítulo 1 – Introdução

O presente estudo insere-se na Unidade curricular de Estágio, do segundo ano do Mestrado em Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) – Portugal, para a obtenção do grau académico de Mestre. Este trabalho está inserido no domínio da Hidrogeologia e foi efetuado através de um protocolo entre a FCUP e a Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto (FCUAN) sendo esta última instituição de direito público Angolano e com sede em Angola-Luanda. A instituição de acolhimento foi a FCUAN.

1.1- Apresentação do tema

Apesar da importância da água subterrânea para o abastecimento público e para a indústria, a Hidrogeologia como ciência precisa investir e aprofundar um nível de conhecimento técnico-científico que possibilite avanços na exploração, aproveitamento e proteção destes recursos hídricos. A atividade de captação e exploração de água subterrânea depende de dispositivos institucionais que disciplinem, controlem ou fiscalizem o seu exercício. A falta desses instrumentos legais coloca em risco a qualidade dos aquíferos e estes, uma vez poluídos a sua recuperação é de longa duração, tecnicamente difícil e muitas vezes economicamente inviável.

A água subterrânea é vista como uma das soluções mais adequadas para remediar o problema de abastecimento de água devido a consequente poluição dos recursos hídricos superficiais. Porém, a má gestão, pode gerar problemas ambientais. Nesse sentido, Ribeiro *et al.* (2011), dizem que a exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos, a ocupação irregular do solo e a ausência de normas legais põem em risco a qualidade natural das águas subterrâneas. Esse fato justifica a realização de estudos envolvendo a ampliação dos conhecimentos no tema abrangendo os recursos hídricos subterrâneos.

A exploração e utilização de águas subterrâneas é de extrema importância sendo necessário garantir a qualidade dos sistemas aquíferos a longo prazo. A delimitação de perímetros de proteção das águas subterrâneas é obrigatória para garantir que os impactos associados à atividade humana sejam medidos e limitados, restringidos ou proibidos e envolve uma série de conceitos e de princípios, todos com o objetivo de limitar as atividades poluentes

em torno do ponto de extração a fim de impedir que os contaminantes atinjam a água que se pretende captar (Moinante & Ferreira, 2004).

Os métodos que permitem estabelecer os perímetros de proteção de captações de água subterrânea são diversos. A sua escolha depende do tipo de aquífero, do critério delimitador e dos dados disponíveis. Além disso, devem fundamentar-se em estudos que permitam caracterizar os aquíferos e avaliar o grau de vulnerabilidade e o risco de poluição. A capacidade de atenuação do solo e do aquífero, o rebaixamento e as zonas de influência da captação; as divisórias de água superficial e subterrânea e o tempo de trânsito da água subterrânea e dos poluentes em solução são aspetos a ter em conta no processo de delimitação das captações (Laureano, 2012).

Apesar de melhor protegidas, em relação às águas superficiais, as águas subterrâneas, quando contaminadas, tendem a recuperar a qualidade muito mais lentamente e de forma mais dispendiosa. Além disto, quando um aquífero está contaminado é muito difícil recuperar as condições iniciais, mesmo que a fonte poluente se encontre desativada. Nestes casos, a poluição só é detetada muito tempo após o início do processo (Moinante, 2003).

Em Angola não existe uma legislação que aborde sobre a proteção, prevenção da poluição das águas subterrâneas, por esta razão este trabalho baseou-se na legislação portuguesa onde estão previstos a proteção, conservação, a prevenção dos recursos hídricos.

Ambiciona-se com este trabalho a obtenção de melhor conhecimento dos aspetos relacionados com os recursos hídricos subterrâneos da região em estudo, contribuir para a divulgação e preservação do sistema aquífero e dar um contributo para o crescimento e evolução da temática uma vez que é uma importante ferramenta no planeamento e na gestão integrada dos recursos hídricos. É de extrema importância que o Governo desenvolva mecanismos para a proteção dos recursos hídricos em Angola uma vez que a adoção de áreas de proteção é de interesse ambiental e de saúde pública e económica. Do ponto de vista ambiental, serve para proteger o sistema e a água subterrânea de possíveis acidentes causados por atividades antrópicas; quanto a saúde para evitar que seja ingerida água contaminada podendo desta forma causar doenças à população; do ponto de vista económico, a preocupação com gastos gerados pela remediação de uma contaminação e a procura por uma fonte de água alternativa.

Com efeito, os principais capítulos que compõem este relatório, dizem respeito a: (i) caracterização e enquadramento geográfico, geológico e hidrogeológico; (ii) definição e delimitação de perímetros de proteção através da avaliação da vulnerabilidade do aquífero à poluição, uma vez que o mesmo possui suscetibilidade a uma carga contaminante (os métodos utilizados para essa avaliação da vulnerabilidade foram o índice DRASTIC (Aller *et al.* (1987) e o índice GOD (Foster 1987) os quais possuem características de simplicidade e utilidade necessárias para poderem vir a ser considerados como referência); (iii) aplicação de um modelo analítico (Raio Fixo Calculado) e os respetivos critérios hidrogeológicos para a delimitação dos perímetros de proteção.

1.2- Tema da investigação

Desde o início da planificação do trabalho, houve a preocupação de se estabelecer um tema de estudo com aplicação prática e que contribuísse para um melhor conhecimento hidrogeológico da área de estudo, tornando-se útil às populações residentes e não só.

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos até os dias de hoje na referida área de estudo, debruçam-se sobre questões relacionadas com a caracterização hidrogeológica, incluindo algumas iniciativas que abordam a temática sobre perímetros de proteção de captações de água subterrânea de forma preliminar, havendo a necessidade da realização de trabalhos mais integradores que abordem sobre o tema da delimitação de perímetros de proteção, uma vez que a proteção das águas destinadas ao abastecimento público surge com a obrigatoriedade de se delimitarem áreas em redor das captações a fim de se restringirem atividades comprometedoras à sua qualidade e quantidade, logo revelou-se importante delimitarem-se perímetros de proteção na referida área em estudo.

1.3- Objetivos

Constitui o objetivo principal deste trabalho a definição de perímetros de proteção em captações de água subterrânea no sistema aquífero Quelo-Luanda, localizadas em áreas urbanas da cidade de Luanda, que é uma área densamente povoada, onde o conflito de

interesses sobre a ocupação e gestão do território é posto à margem das condições básicas necessárias à preservação dos sistemas hídricos subterrâneos, porque as populações não os observam diretamente ou porque o seu funcionamento hidráulico não é reconhecido. Os recursos devem ser explorados e preservados de ações extremas que conduzam à diminuição da qualidade e quantidade de água. Para tal, uma das medidas possíveis consiste na proteção das captações através de ações preventivas que restrinjam atividades em áreas delimitadas por perímetros de proteção.

Sendo assim, os objetivos específicos focam-se em:

- Elaborar a proposta metodológica para a delimitação de perímetros de proteção das captações;
- Aplicar a metodologia proposta em três áreas da província de Luanda;
- Elaborar recomendações de medidas de gestão do recurso hídrico.

Pretendeu-se, assim, elaborar um Relatório de Estágio sobre este tema, o qual contribuisse no auxílio de decisões com base em conhecimentos científicos, tecnológicos uma vez que a procura de melhores soluções beneficia tanto as atuais gerações como as futuras.

Capítulo 2 - Considerações hidrogeológicas na definição de perímetros de proteção

2.1- Águas subterrâneas

Aproximadamente 3/4 da superfície da Terra é coberta por água. A água é uma substância essencial para manutenção dos seres vivos, sendo reconhecida pela ciência como o ambiente em que surgiu a própria vida. Configura a contínua circulação entre os oceanos, a atmosfera e os continentes, resultando na renovação constante da água doce.

De toda água existente nos continentes no estado líquido (água subterrânea + água superficial + humidade do solo) mais de 98% são águas subterrâneas. Segundo (Fetter, 2001) estima-se que a água salina nos oceanos é responsável por 97,2% do total da água do planeta. Calotas de gelo e glaciares detêm 2,14%; as águas subterrâneas até uma profundidade de 4.000 metros (13.000 pés (ft)) representam 0,61 do total; humidade do solo, 0,005; lagos de água doce, 0,009; atmosfera, 0,001 (Figura 1).

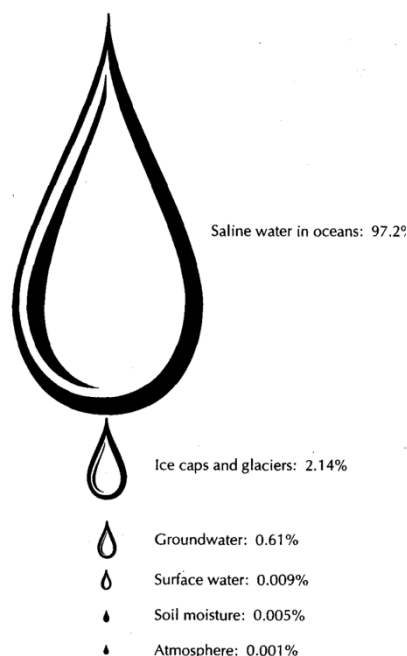


Figura 1- Distribuição da água no planeta (extraído de Fetter, 2001).

As águas subterrâneas, além de mais protegidas contra a poluição e os efeitos da sazonalidade, apresentam em geral uma boa qualidade, decorrente da filtragem natural obtida como resultado da sua percolação no solo e subsolo. O seu aproveitamento tem-se revelado uma alternativa mais económica, evitando custos crescentes com barragens e adutoras e limitando o seu tratamento, na maioria dos casos (Sousa, 2011).

2.2- O ciclo hidrológico

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 2) está ligado ao movimento e troca de água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na hidrosfera, entre os oceanos, os glaciares e as calotes polares, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera.

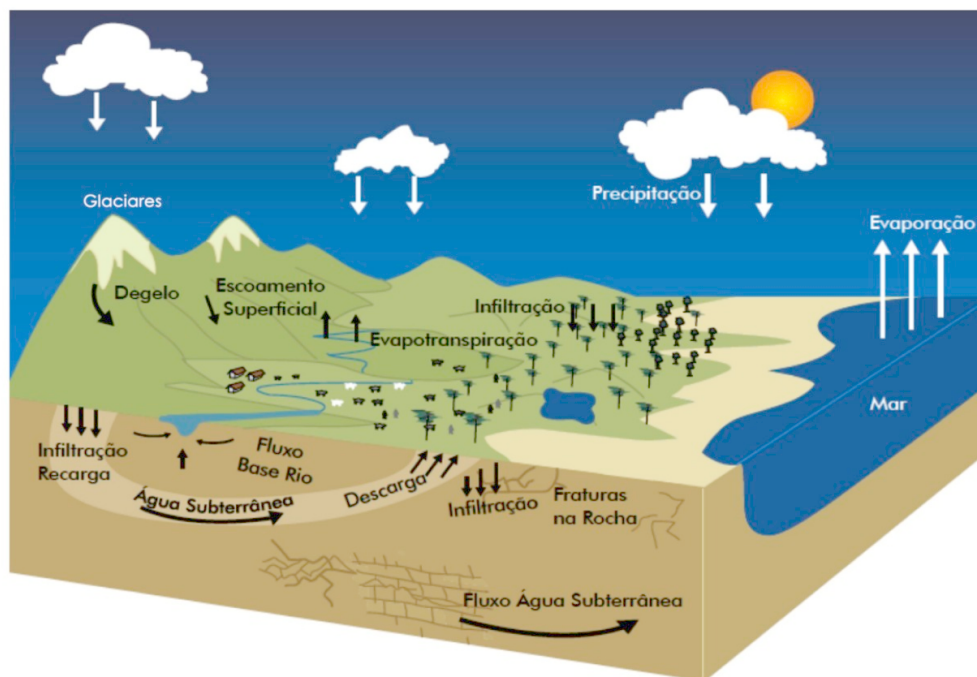


Figura 2- Ciclo hidrológico (MMA, 2007).

O movimento contínuo da água inicia a partir da radiação solar e do metabolismo dos seres vivos (evapotranspiração), que fornecem energia para que a água mude do estado líquido para o gasoso e consiga atingir a atmosfera no processo denominado evaporação.

Posteriormente a água presente na atmosfera precipita e atinge novamente o solo, percorrendo nos canais de drenagem, movimento chamado escoamento superficial. Parte dessa água infiltra-se no solo, recebendo o nome de escoamento subterrâneo (Freire & Omena, 2005).

Principalmente em função do ciclo hidrológico, a água que se infiltra no subsolo ajuda a manter a dinâmica das águas superficiais, ao juntar-se à massa da água subterrânea, move-se através dos poros da matéria do subsolo, podendo reaparecer na superfície em locais de nível inferior ao que penetrou. A água subterrânea escoar naturalmente em tais lugares em forma de nascentes, mantendo o fluxo dos cursos em período de estiagem. Os aquíferos e águas superficiais não são componentes isolados do ciclo hidrológico, mas interagem em uma grande variedade de casos, dependendo de variações na fisiografia, geologia, fatores bióticos e climatológicos, ou seja, a preservação ou a contaminação de uma parte afeta diretamente a outra. O entendimento básico da interação entre as águas subterrâneas e superficiais é imprescindível para um correto gerenciamento dos recursos hídricos (Sophocleous, 2004).

A parte de precipitação que atinge o solo pode-se escoar superficialmente ou infiltrar-se. Quando se infiltra, aumenta a água armazenada no solo (Pereira *et al.*, 1997). Porém, cada tipo de solo apresenta uma capacidade de armazenamento específica, ou seja, as propriedades físicas do solo podem afetar significativamente a capacidade de produção e armazenamento de água em bacias hidrográficas. Solos com textura mais fina apresentam maior superfície específica e acabam por reter maior quantidade de água ao se comparar com solos de textura grosseira (Tucci, 2001).

A distribuição da água no solo e nas formações geológicas, duas zonas são consideradas de acordo com a proporção relativa do espaço poroso ocupado pela água: zona não saturada (ou zona de aeração) e zona saturada (ou zona de saturação), no topo da qual ocorre a superfície freática. A zona de aeração apresenta poros com ar, sendo que na zona saturada esses poros são ocupados por água, conforme demonstrado na Figura 3 (Carmo, 2014).

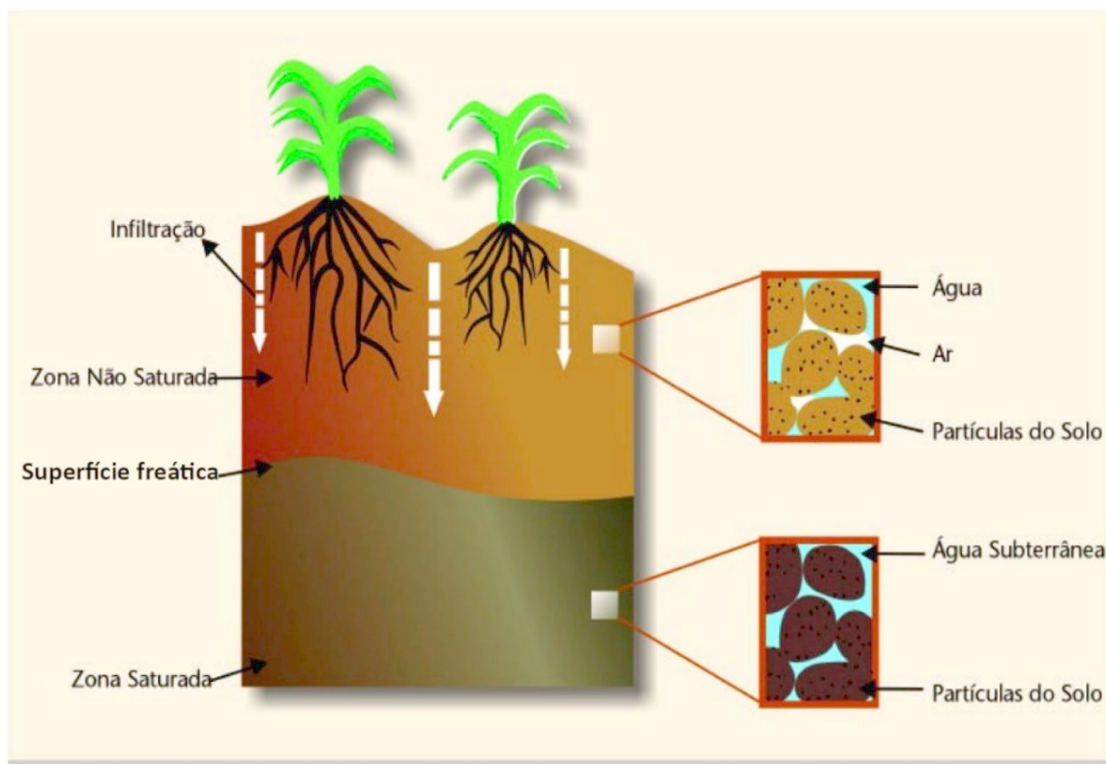


Figura 3- Zona não saturada e Zona saturada no subsolo (IGM, 2001).

2.3- Sistemas aquíferos

De forma geral, considera-se que o solo é constituído de uma matriz porosa composta por partículas sólidas e por espaços vazios (poros), que podem ou não estarem preenchidos por água. Na sua forma mais simples, tem-se uma hidroestratigrafia constituída por uma zona saturada (a qual corresponde ao aquífero) e outra não saturada (também chamada de zona vadosa ou de aeração), conforme ilustra a Figura 4.

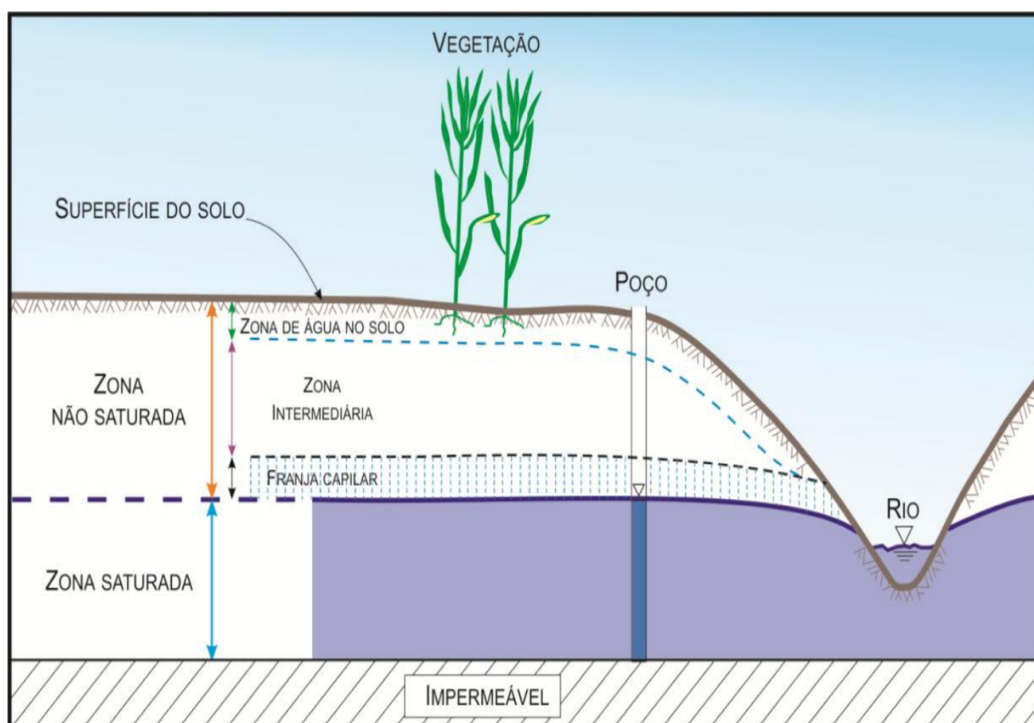


Figura 4- Representação esquemática do subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade (adaptado de Bear & Verruit, 1987).

A zona saturada possui espaços porosos ou fraturas completamente preenchidos por água. Dependendo das suas características, em termos de porosidade e permeabilidade, pode ser designada como aquífero, aquícludo, aquítardo e aquífugo.

Denomina-se aquífero aquela litologia que além de conter água nos poros, permite uma boa transmissão de água armazenada. Para tal, essa litologia deve ser porosa e permeável, capaz de ceder água de forma economicamente viável e ambientalmente sustentável para exploração. Esta zona é limitada na sua zona inferior por um meio hidrogeológico, caracterizado normalmente por ser um meio impermeável ou semi-impermeável (Feitosa *et al.*, 2008).

Na zona não saturada ocorre a ligação entre a zona saturada e a atmosfera, encontrando-se os poros parcialmente preenchidos por água e por ar. Esta zona divide-se em três horizontes, denominados por zona de água do solo (ou zona de evapotranspiração), zona intermediária e franja capilar (Feitosa *et al.*, 2008):

- Zona de água no solo: compreende a camada mais superficial, limitada inferiormente pelo enraizamento das plantas, onde ocorre a evapotranspiração;
- Zona intermediária: possui limite superior e inferior caracterizado pelo enraizamento das plantas e pela franja capilar, respetivamente, sendo a humidade proveniente de água capilar e de água retida por forças não capilares;
- Franja capilar: situa-se entre a superfície freática e o limite de ascensão capilar da água, sendo sua espessura variável e depende da distribuição e tamanho dos poros, além da homogeneidade do terreno, podendo atingir um teor de água de cerca de 75%.

Os aquíferos podem ser classificados do seguinte modo (figura 5):

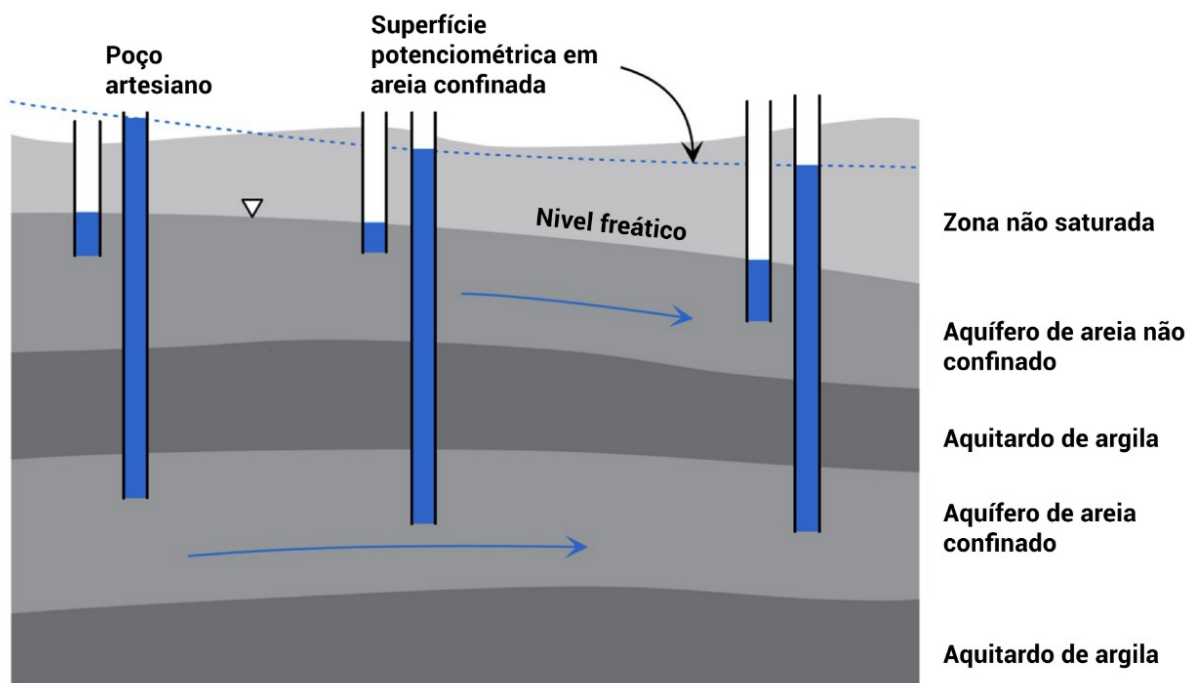


Figura 5- Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos (adaptado de Fitts, 2002).

Aquífero livre: formação geológica permeável e parcialmente saturada de água sendo limitada na base por uma camada impermeável; neste caso o nível de água no aquífero corresponde à superfície freática, a qual está à pressão atmosférica e a sua recarga faz-se pelas camadas que estão por cima.

Aquífero confinado: formação geológica permeável e completamente saturada de água, sendo limitada no topo e na base por camadas impermeáveis, neste caso a pressão da água no limite superior do aquífero é superior à pressão atmosférica e a sua recarga é feita lateralmente e não pela camada que está por cima; a este tipo de aquífero corresponde o conceito de superfície potenciométrica.

Podem ainda definir-se outras estruturas hidrogeológicas, tais como (IGM, 2001):

Aquitardo: formação geológica que pode armazenar água mas que a transmite lentamente, não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de captações.

Aquicludo: formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite (a água não circula).

Aquífugo: formação geológica impermeável que não armazena nem transmite água.

Para que haja água subterrânea passível de exploração, esta tem que atravessar e circular através das formações geológicas que têm de ser porosas e permeáveis. Ou seja, o meio deve apresentar características favoráveis de porosidade e permeabilidade, permitindo armazenar e libertar água.

Uma formação é classificada como porosa quando a mesma é formada por um agregado de grãos entre os quais existem espaços vazios (intergranulares) que podem ser ocupados pela água, e são chamados de poros. Existem outras formações formadas por material rochoso onde os espaços vazios correspondem a descontinuidades planares (tais como diáclases, falhas e superfícies de estratificação) e não poros intergranulares (Figura 6). O termo porosidade é, normalmente, aplicado quer aos poros intergranulares quer às descontinuidades planares.

A porosidade das formações será então a razão entre o volume de vazios (poros) e o volume total da formação. Os espaços vazios podem estar interligados (Figura 6) o que condiciona a permeabilidade do meio poroso.

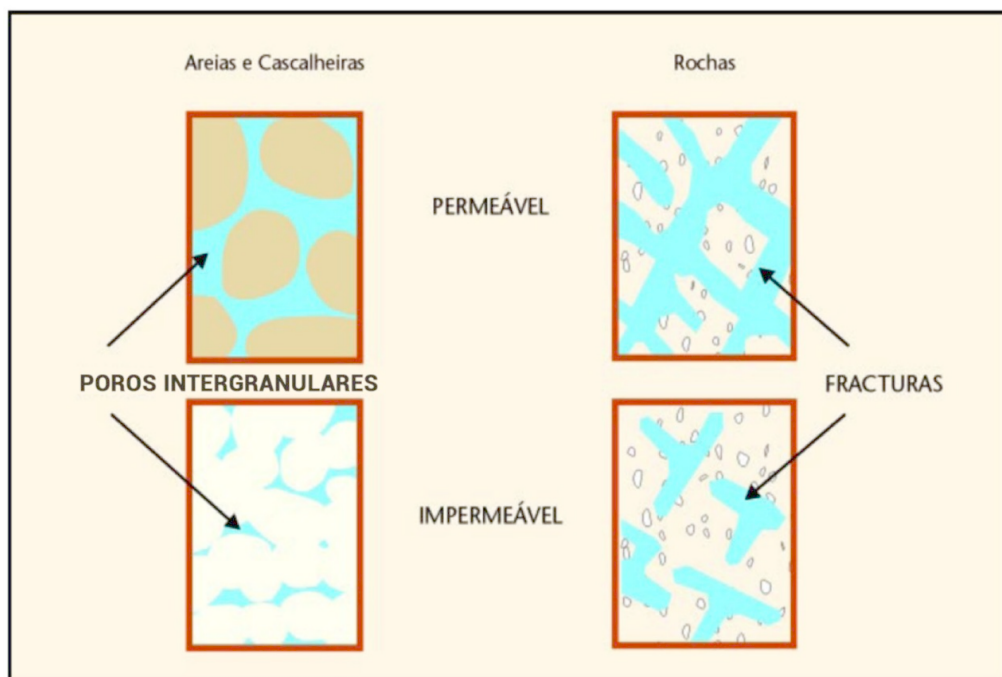


Figura 6-Porosidade e Permeabilidade (IGM, 2001).

Tendo em conta o meio de escoamento, os aquíferos poderão ser classificados como porosos (no caso da porosidade intergranular), fraturados e cársticos (Figura 7).

Nos **aquíferos porosos**, os poros existentes representam os espaços que se formam entre os grãos quando o sedimento se depositou originalmente (porosidade primária). Uma particularidade deste tipo de aquífero é a sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua em qualquer direção (isotropia), em função da distribuição espacial da carga hidráulica. O fluxo de água subterrânea é controlado pela direção do gradiente no meio poroso, e a velocidade da água pode ser calculada pela Lei de Darcy (Sousa, 2011).

Nos aquíferos porosos podem, no entanto, surgir fraturas devido a pressões aplicadas sobre o aquífero. Estas fraturas apresentam normalmente uma direção preferencial de orientação, relacionada com as tensões aplicadas, provocando deste modo uma anisotropia no sistema aquífero. A água subterrânea é forçada a circular ao longo das fraturas cuja direção faz

um determinado ângulo com a direção do gradiente hidráulico. Em consequência, a Lei de Darcy não poderá ser aplicada uma vez que assume fluxo laminar (Sousa, 2011).

Os **aquíferos fraturados** ou fissurados estão geralmente associados a rochas ígneas e metamórficas, onde a água circula através de fraturas ou pequenas fissuras.

Os **aquíferos cársicos** ocorrem em rochas solúveis, normalmente calcário e dolomito. Segundo a EPA (1994), o termo cársico deverá ser aplicado no caso de aquíferos carbonatados. Neste tipo de aquífero, as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, podendo originar rios subterrâneos.

Os aquíferos carsificados e fraturados podem ocorrer sob diversas condições de confinamento. Em condições livres ou de fraco confinamento, estes podem apresentar elevadas velocidades de fluxo perante recargas rápidas motivadas por fortes precipitações. O tempo de transporte nestes aquíferos é consequentemente muito menor que o de aquíferos em meio poroso, o que os torna mais vulneráveis à poluição. A legislação portuguesa refere que no caso de zonas que apresentem conexão hidráulica por condutas cársicas ou fissuras, o perímetro de proteção pode incluir zonas de proteção especial com restrições idênticas às da zona de proteção imediata (Sousa, 2011).

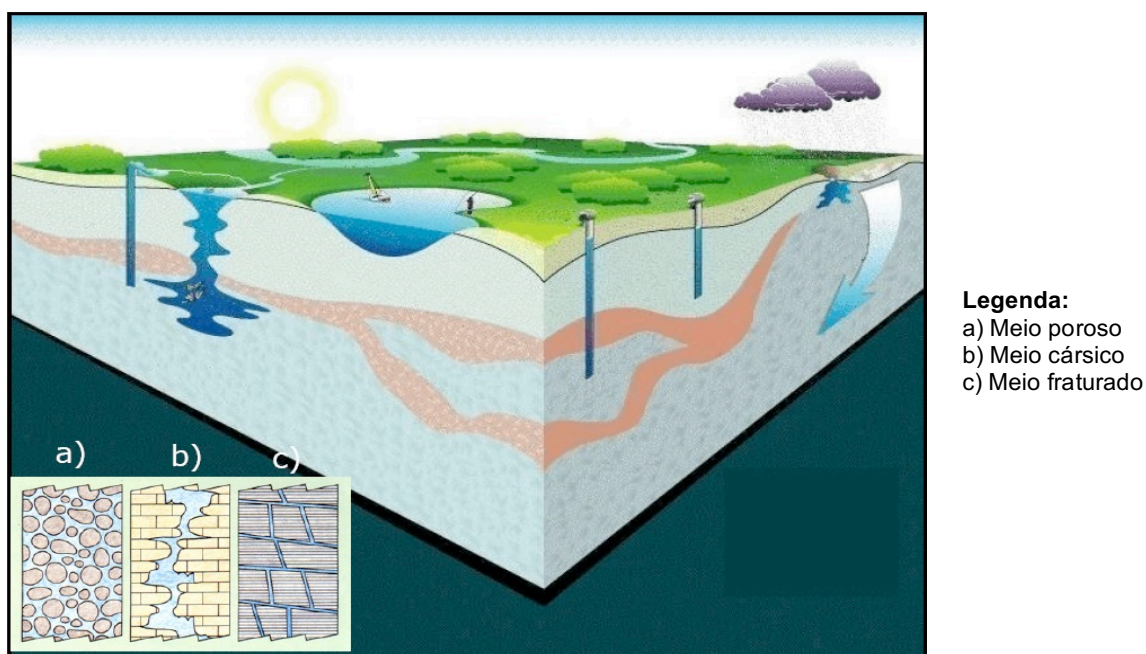


Figura 7-Circulação da água nos meios porosos, cársicos e fraturados (Fonte APRH, 2001).

Capítulo 3 – Vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas

Antes de avançar no tema referente aos perímetros de proteção, torna-se relevante abordar duas importantes noções que são introduzidas em estudos de poluição de águas subterrâneas. Essas noções correspondem à vulnerabilidade e ao risco de poluição. Muitas vezes a vulnerabilidade e risco de poluição têm sido confundidos. O conceito de risco de poluição não depende somente da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que podem entrar no ambiente subterrâneo. De acordo com este conceito, pode-se configurar uma situação de alto índice de vulnerabilidade, porém com baixo risco de contaminação caso não haja carga poluidora significativa ou vice-versa. O conceito de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição é apresentado e discutido na secção 3.2.

3.1- Fontes de poluição

A água pode ter a qualidade afetada pelas mais diversas atividades do homem, sejam elas domésticas, comerciais ou industriais. Cada uma dessas atividades gera poluentes característicos que têm uma determinada implicação na qualidade do corpo recetor.

Existem três tipos de poluição de acordo com a sua origem: doméstica, industrial e agropecuária.

A poluição doméstica assume-se como uma fonte de poluição das águas, sobretudo em áreas com elevada densidade populacional. As águas residuais são na maior parte dos casos lançadas, sem qualquer tipo de tratamento, para rios, lagos e albufeiras o que implica pôr em risco a saúde pública (IGM, 2001).

O sector industrial é o maior poluidor, uma vez que grande parte das empresas utiliza enormes quantidades de água em diferentes processos de fabrico. Esta é utilizada na lavagem dos produtos onde lhe são adicionados detergentes, assim como numerosas substâncias químicas e tóxicas, que a tornam imprópria, sendo muitas vezes lançada direta ou indiretamente,

nos rios, ribeiras, lagos, albufeiras e no mar sem qualquer tratamento. Estas águas vão-se infiltrar nos solos e contaminar as águas subterrâneas colocando em risco a saúde pública (IGM, 2001).

A poluição agropecuária é o resultado da utilização excessiva de fertilizantes e pesticidas na agricultura moderna. A elevada presença de dejetos, substâncias químicas, componentes das rações, bem como o uso de detergentes utilizados na lavagem de pocilgas e estábulos, contribuem para a poluição dos solos e a degradação dos recursos hídricos, quer superficiais, quer subterrâneos (IGM, 2001).

A (Figura 8) ilustra os vários tipos de poluição nas águas subterrâneas, sendo este um problema bastante preocupante a nível mundial.

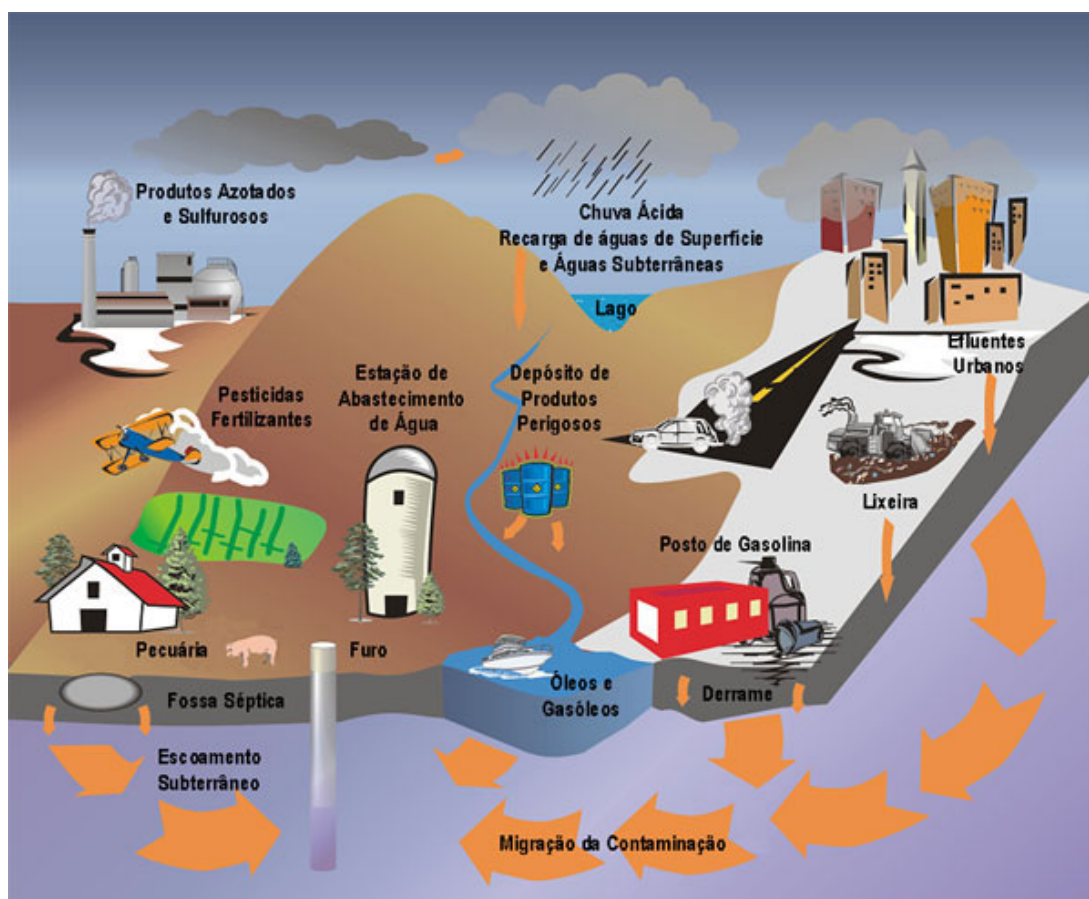


Figura 8- Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas (IGM, 2001).

Tendo em conta a origem da fonte de poluição e sua dispersão pelo solo consideram-se três diferentes tipos:

Poluição atmosférica são classificadas em fixas (principalmente indústrias) e móveis (veículos automotores, trens, aviões, navios, etc.). Quanto aos fatores que causam a poluição dividem-se em (Santos, 2002): naturais que são aqueles que têm causas nas forças da natureza, como tempestades de areia, queimadas provocadas por raios e as atividades vulcânicas; e artificiais que são aqueles causados pela atividade do homem, como a emissão de gases de automóveis, queima de combustíveis fósseis em geral, materiais radioativos, queimadas, etc. (Poluição, 2003).

Poluição pontual, refere-se àquelas onde os poluentes são lançados em pontos específicos dos corpos de água e de forma individualizada, as emissões ocorrem de forma controlada, podendo-se identificar um padrão médio de lançamento. Geralmente a quantidade e composição dos lançamentos não sofrem grandes variações ao longo do tempo (Mierzwa, 2001). Exemplos típicos de fontes pontuais de poluição são as indústrias e estações de tratamento de esgotos.

Poluição difusa dá-se quando os poluentes atingem os corpos de água de modo aleatório, não havendo possibilidade de estabelecer qualquer padrão de lançamento, seja em termos de quantidade, frequência ou composição. Por esse motivo o seu controle é bastante difícil em comparação com a poluição pontual (Mierzwa, 2001). Exemplos típicos de poluição difusa são os lançamentos das drenagens urbanas, escoamento de água de chuva sobre campos agrícolas e acidentes com produtos químicos ou combustíveis. As fontes mistas são aquelas que englobam características de cada uma das fontes anteriormente descritas.

As fontes de contaminação das águas subterrâneas podem ter diversas origens, as mais comuns estão relacionadas as atividades humanas, principalmente por meio de usos industriais, domésticos e agrícolas. Além disso, podem ser provenientes da construção do próprio poço, que quando feito de maneira inadequada, permite a entrada de água superficial poluída (Foster *et al.*, 2006) ou de poços abandonados não obstruídos. A contaminação ocorre também de forma natural, quando a descarga é criada pela atividade humana, como por exemplo a intrusão salina do mar em aquíferos costeiros ou a lixiviação de minerais dissolvidos (Feitosa & Manoel, 2000), ou ainda pela dissolução de minerais em função da natureza do material geológico. O potencial

de contaminação da água subterrânea vai depender da carga contaminante e da vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Avaliar os riscos e as fontes de contaminação do aquífero é importante para a definição de ações necessárias para sua proteção (Foster *et al.*, 2006).

3.2- Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas

Segundo Lobo Ferreira e Cabral (1991) *in* Lobo Ferreira *et al.*, 2009, o conceito de vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas foi definido de acordo com as conclusões da conferência internacional sobre "*Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*", realizada em 1987 (Duijvenbooden and Waegeningh (Ed.), 1987), como:

"a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero".

Para alguns autores como (Nobre, 2006), a vulnerabilidade não é uma propriedade absoluta, mas uma indicação relativa das áreas onde a contaminação tem maior probabilidade de ocorrer. Ou seja, a vulnerabilidade é uma representação do grau de suscetibilidade do aquífero perante a uma contaminação e serve principalmente para planear qual o uso a dar ao solo com finalidade de proteger os aquíferos.

A vulnerabilidade das águas subterrâneas é uma propriedade não medida diretamente, baseando-se na avaliação de diversos parâmetros que variam entre as regiões em função do ambiente físico que as caracteriza. Os principais parâmetros de vulnerabilidade estão associados com as configurações hidrológicas e geológicas, com as propriedades hidráulicas do sistema de águas subterrâneas, com o clima e com a topografia (UNESCO, 2015).

O conceito de vulnerabilidade do aquífero implica, sobretudo, dois conceitos próprios, os quais são: vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica (Antonakos e Lambrakis, 2006).

A vulnerabilidade intrínseca pode ser definida como uma propriedade qualitativa relativa, considerando as características hidrogeológicas da área, mas independente do tipo e origem do contaminante (Vrba and Zaporozec, 1994 *in* Huneau *et al.*, 2013). Segundo Gogu e Dassargues (1999), é um termo usado para definir a vulnerabilidade das águas subterrâneas a contaminantes

gerados por atividades humanas, tendo em conta as características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas inerentes a uma área, mas que é independente da natureza dos contaminantes.

A vulnerabilidade específica pode ser expressa como a probabilidade de um aquífero ser poluído por contaminantes que são introduzidos na superfície do solo. Isto é determinado pela vulnerabilidade intrínseca do aquífero e pela carga de contaminante que é aplicada num ponto específico da bacia hidrológica, ou mesmo numa região em torno deste ponto. A carga de contaminante é determinada pela quantidade, pelas propriedades físico-químicas e pela forma como os vários contaminantes são libertados no meio ambiente (Antonakos e Lambrakis, 2006).

Deve acrescentar-se que a vulnerabilidade é um conceito distinto do risco de poluição, por esse motivo Lobo Ferreira e Oliveira (2004) destacam que é importante enfatizar a diferença entre vulnerabilidade e risco de poluição. Pois, risco de poluição depende não só das características intrínsecas do aquífero, mas também, da presença de cargas poluentes significantes que possa ingressar no meio ambiente subterrâneo.

O conhecimento da vulnerabilidade, de um sistema aquífero à poluição, de extrema importância na utilização correta do solo em torno de um sistema aquífero. Se um aquífero apresentar um valor de vulnerabilidade à poluição muito alto, é necessário condicionar qualquer empreendimento que possa afetar esse aquífero e, em situações extremas, o aquífero pode ser considerado com um qualquer estatuto de proteção, para garantir uma melhor qualidade da água subterrânea (LNEC, 2009).

Segundo Lobo Ferreira e Oliveira 2004; Ribeiro, 2005, Hirata e Fernandes, 2008, uma determinada atividade antrópica não apresenta um grande risco, se estiver localizada em uma região considerada de baixa vulnerabilidade, da mesma forma que, uma área considerada de alta vulnerabilidade, pode estar isenta de qualquer tipo de carga poluente e não apresentar risco algum. No entanto, Foster *et al.*, (2013) ressaltam que, embora a “vulnerabilidade do aquífero” seja cientificamente fundamentada, ela não pode ser definida com rigor, pois: os aquíferos são até certo grau, vulneráveis à poluição por contaminantes altamente instáveis e persistentes, tais como: águas salgadas e em alguns casos, ao nitrato. E a vulnerabilidade específica se apresenta na realidade para o tipo de contaminante e cenário de poluição.

Desse modo, a avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas deve servir, sobretudo, para identificar quais os aquíferos são mais sensíveis, ou qual é a parte mais vulnerável à poluição (Santos et al., 2010).

3.3- Metodologias para a avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas

Para a avaliação da vulnerabilidade foram desenvolvidos vários métodos, tais como o AVI (Van Stimpvoort *et al.*, 1992), o GOD (Foster 1987), o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), o SINTACS (Civita *et al.*, 1990), o EPPNA (INAG, 1998), IS- (INAG, 1998), entre outros, utilizando parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras características particulares e bem definidas.

A maioria dos métodos de avaliação da vulnerabilidade é de natureza empírica, o que permite interpretações mas o interesse em avaliar o nível de vulnerabilidade dos aquíferos decorre da necessidade de fornecer, às autoridades competentes, um instrumento útil à tomada de decisões em relação ao ordenamento territorial (Nascimento, 2013). Muitas vezes, a finalidade desta avaliação é a criação de uma carta temática da vulnerabilidade do local de estudo.

Em seguida, apresentam-se descrições de alguns métodos de avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos, como base de referência para o desenvolvimento do método de avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos.

3.3.1-Índice DRASTIC

Este método foi apoiado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos, por Aller *et al.* (1987), sendo o mesmo um modelo qualitativo para avaliar a poluição potencial de águas subterrâneas, utilizando variáveis hidrogeológicas.

O mesmo autor define que existem vários pressupostos que fazem parte deste índice, como a introdução do contaminante à superfície com transporte vertical do contaminante até atingir o aquífero. Admite-se então que mobilidade do contaminante é igual à da água e a aplicação do método deve incidir numa área mínima de 0,4 km².

Segundo Aller *et al.* (1987) o índice DRASTIC (Figura 9) avalia os sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos seguintes:

D = *Depth to groundwater* (distância vertical entre a superfície topográfica e a superfície freática ou o topo do aquífero confinado);

R = *Net Recharge* (recarga do aquífero);

A = *Aquifer Media* (material do aquífero);

S = *Soil Media* (tipo de solo);

T = *Topography* (topografia);

I = *Impact of the vadose zone* (impacto da zona não saturada);

C = *Hydraulic conductivity* (condutividade hidráulica).

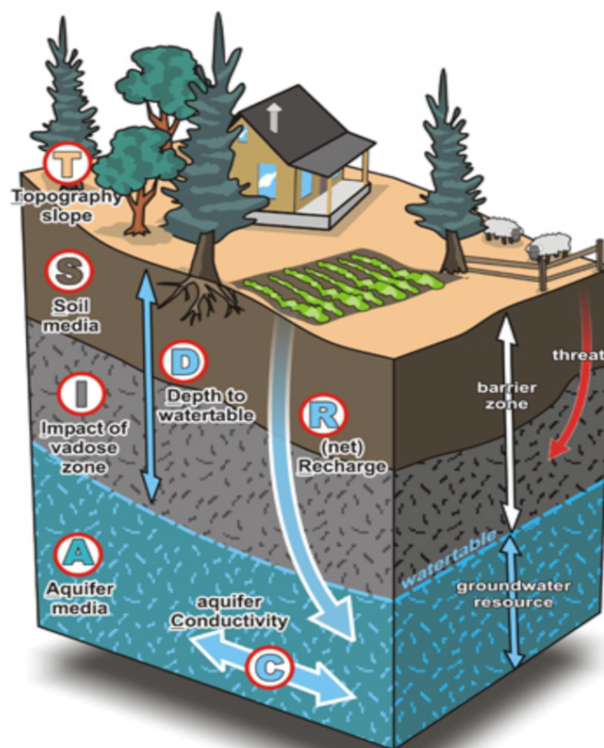


Figura 9- Método DRASTIC - Greater Oliver Groundwater Vulnerability, (2011).

O índice DRASTIC é composto pela soma dos produtos entre o peso de cada parâmetro e a classificação de cada um, obtendo-se a pontuação final numérica ou valor do índice. Quanto maior o índice DRASTIC, maior será o potencial da contaminação das águas subterrâneas (UNESCO, 2015). Segundo Lobo Ferreira, *et al.* (2009), o índice de vulnerabilidade DRASTIC obtém-se através da seguinte expressão:

$$DRASTIC = Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Sp \times Si + Tp \times Ti + Ip \times Ii + Cp \times Ci$$

Onde a sigla *i* representa o índice atribuído ao parâmetro e a sigla *p* o peso respetivo.

A Tabela 1 resume os parâmetros, a sua definição, o peso, o tipo de valores que o parâmetro pode apresentar e o índice para cada situação.

Tabela 1- Os sete parâmetros do Índice DRASTIC

Parâmetro	Definição	Peso	Caracterização do parâmetro	Índice
(D) Profundidade do nível freático	É a distância, medida na vertical, entre a superfície topográfica e a superfície freática ou o topo do aquífero confinado.	5	>30,5 (m)	1
			22,9 – 30,5 (m)	2
			15,2-22,9 (m)	3
			9,1-15,2 (m)	5
			4,6-9,1 (m)	7
			4,6-9,1 (m)	9
			<1,5 (m)	10
(R) Recarga do aquífero	É a quantidade de água por unidade de área que penetra na superfície do solo e atinge o aquífero.	4	< 51 (mm/ano)	1
			51-102 (mm/ano)	3
			102-178 (mm/ano)	6
			178-254 (mm/ano)	8
			> 254 (mm/ano)	9
(A) Material do aquífero	É a tipologia da rocha, com capacidade para armazenar água subterrânea. O tipo de rocha pode afetar, de forma significativa, o fluxo de contaminantes nas águas subterrâneas.	3	Xisto argiloso, argilito	1-3
			Rocha metamórfica/ígneas	2-5
			Rocha metamórfica / ígneas alterada	3-5
			Arenito, calcário e argilito estratificados	5-9
			Arenito maciço	4-9
			Calcário maciço	4-9
			Areia e cascalho	4-9
			Basalto	2-10
			Calcário carsificado	9-10
(S) Tipo de solo	É a camada de materiais com evolução pedológica, situados na zona mais superficial da superfície terrestre. A percolação de contaminante é	2	Argila não agregada e não expansível	1
			Lodo ("Muck")	2
			Franco argiloso	3
			Franco siltoso	4
			Franco	5
			Franco arenoso	6
			Argila agregada e/ou expansível	7

	altamente condicionada pelo tipo de solo presente em cada região.		Turfa	8
			Areia	9
			Balastro	10
			Fino ou ausente	10
(T) Topografia	Este parâmetro é determinado pelo declive da superfície da área em estudo.	1	>18 (por cento do declive)	1
			12-18 (por cento do declive)	3
			6-12 (por cento do declive)	5
			2-6 (por cento do declive)	9
			0-2 (por cento do declive)	10
(I) Impacto da zona não saturada	Refere-se à camada localizada entre a base do solo e o topo do aquífero. O impacto deste parâmetro para a vulnerabilidade, é medido em termos da porosidade dos materiais, da sua permeabilidade e da espessura que apresenta	5	Camada confinante	1
			Argila/Silte	2-6
			Xisto argiloso, argilito	2-5
			Calcário	2-7
			Arenito	4-8
			Arenito, calcário e argila estratificados	4-8
			Areia e basalto com percentagem significativa de silte e argila	4-8
			Rocha metamórfica/ígneia	2-8
			Areia e cascalho	6-9
			Basalto	2-10
			Calcário carsificado	8-10
(C) Condutividade hidráulica do aquífero	É um parâmetro que traduz o modo como o aquífero transmite a água se pode deslocar dentro de determinada formação geológica.	3	<4,1 (m/d)	1
			4,1-12,2 (m/d)	2
			12,2-28,5 (m/d)	4
			28,5-40,7 (m/d)	6
			40,7-81,5 (m/d)	8
			>81,5 (m/d)	10

O valor do Índice DRASTIC pode variar entre 23 e 226 unidades. Nobre (2006) descreve que raramente os valores abrangem essa ordem de magnitude, geralmente varam entre 50 e 200. Os valores mais baixos correspondem a vulnerabilidade mais baixa e os valores mais altos a vulnerabilidade mais elevada. A Tabela 2 apresenta a relação entre o valor quantitativo da vulnerabilidade DRASTIC e a designação qualitativa da vulnerabilidade de determinado aquífero à poluição (LNEC, 2009).

Tabela 2- O valor do índice e as classes de vulnerabilidade do Índice DRASTIC. (Adaptado pelo LNEC 2011)

Valores	Nível de Vulnerabilidade
≤ 79	Negligenciável
80 – 99	Muito baixa
100 – 119	Baixa
120 – 139	Moderada
140 – 159	Alta
160 – 179	Muito alta
≥ 180	Extremamente alta

3.3.2- Índice GOD

A metodologia GOD foi desenvolvida em 1987 por Foster e trata-se de um dos métodos mais utilizados na determinação da vulnerabilidade, devido a sua simplicidade de conceitos e aplicação (Ribeiro, 2011). A metodologia GOD visa avaliar o quanto um determinado aquífero está suscetível à contaminação (Romeiro, 2012). Este método tem sido amplamente utilizado na América Latina e Caribe, devido a sua clareza conceitual e a simplicidade de aplicação, considerando dados pré-existentes (Pavão, 2004).

Este método fundamenta-se nos parâmetros e dinâmicas de recarga dos aquíferos e na capacidade natural dos materiais que formam a zona não saturada para atenuar fluídos, que varia de acordo com as condições da geologia superficial e das profundidades do topo dos níveis da água nos mesmos (Meaulo, 2006). De acordo com Vogel (2008) a metodologia GOD consiste na avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos e de cargas poluentes provenientes de atividades antrópicas realizadas na superfície terrestre. A determinação do índice de vulnerabilidade GOD compreende uma sequência de fases. Os princípios do método estão baseados em dois fatores hidrogeológicos de proteção do aquífero: a acessibilidade hidráulica à zona saturada e a capacidade de atenuação da zona não saturada. Somente o método GOD contempla parcialmente o tipo de aquífero em relação ao seu comportamento hidráulico e o grau de consolidação (Brito, 2013). Assim o método GOD, define a vulnerabilidade das águas subterrâneas a uma contaminação geral, em função de três parâmetros (Foster *et al.*, 2002):

- O tipo de confinamento da água subterrânea (**G**);
- As características das camadas sobrejacentes ao aquífero (**O**);
- A profundidade do nível freático ou topo do aquífero confinado (**D**).

O índice de vulnerabilidade é o resultado dos valores atribuídos aos três parâmetros. Os parâmetros só podem assumir valores entre 0 e 1, sendo o resultado final, entre o produto dos três parâmetros, normalmente um valor menor do que o valor atribuído a cada um dos parâmetros (Gogu e Dessargues, 1999).

O Índice de vulnerabilidade é obtido pelo produto da multiplicação dos valores atribuídos a cada parâmetro. O resultado pode variar de 0 a 1, indicando as classes de vulnerabilidade natural. Estes referidos índices pontuais foram obtidos no presente trabalho através de dados de poços.

$$I_{GOD} = I_G \times I_O \times I_D$$

A Figura 10 está esquematizada a sequência de fases para a determinação do índice de vulnerabilidade GOD.

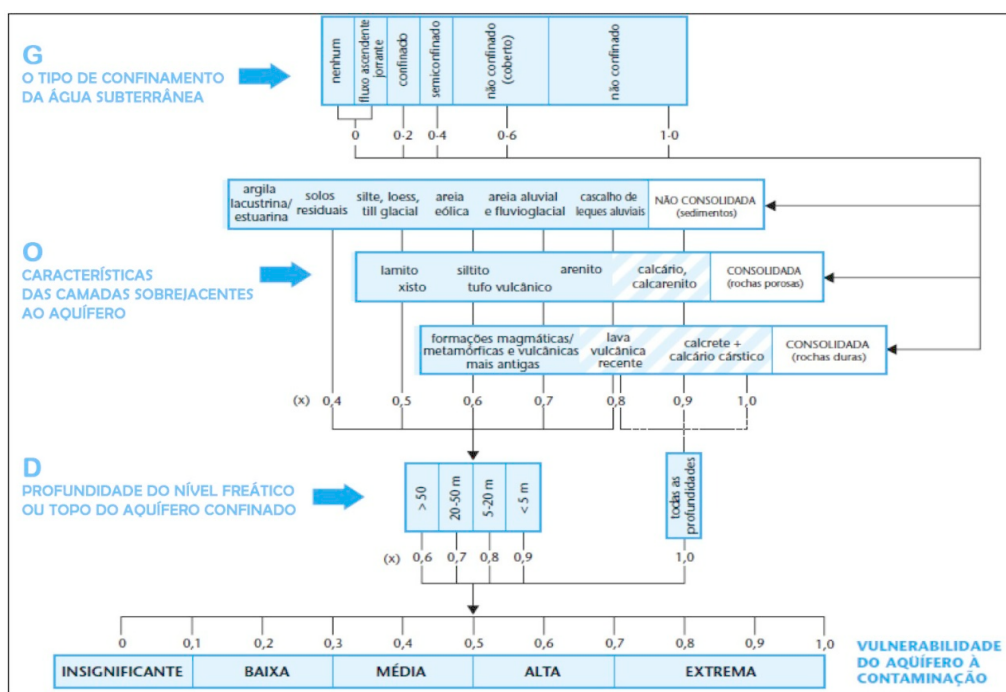


Figura 10- Sequência de passos usados no método GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al., 2006).

O valor máximo do índice é 1,0, representando uma vulnerabilidade máxima. O valor mínimo é 0,016, se houver aquífero, ou mesmo zero se não houver aquífero (Lobo Ferreira et al., 2009). A Tabela 3 resume as classes de vulnerabilidade do aquífero pelo método GOD.

Tabela 3- Classes de vulnerabilidade do aquífero segundo o método GOD. (Adaptada de Barboza et al., 2007 in de Souza, 2009).

Intervalo	Classe
0 – 0,1	Insignificante
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Média
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 1,0	Extrema

Segundo Foster *et al.*, (2006) o parâmetro relacionado à “profundidade do nível freático ou topo do aquífero confinado (D)” tem um papel importante na metodologia GOD, uma vez que pequenas alterações no valor desse parâmetro alteram significativamente o índice de vulnerabilidade. Portanto, nas áreas onde se encontram os níveis mais rasos permitem que o contaminante chegue mais rápido à zona saturada, devido à menor distância que o contaminante deve percorrer desde a superfície do terreno até o limite superior do aquífero.

Capítulo 4- Perímetros de proteção das águas subterrâneas

Um perímetro de proteção pode ser definido como um conjunto de zonas ou áreas, criadas mediante restrições específicas de cada zona, sobre as atividades socioeconómicas, o ordenamento e a ocupação do território na superfície de influência de uma captação de água subterrânea, com o intuito de garantir a qualidade e a quantidade de água ao utilizador. Com esta delimitação, pretende-se reduzir o risco de contaminação, ou, caso aconteça, a contaminação, procurando evitar que o contaminante chegue às captações em concentrações consideradas perigosas (Prada *et al.* 2008).

O perímetro de proteção de uma captação de água subterrânea é necessário para uma proteção completa contra os contaminantes degradáveis e não degradáveis. Para os degradáveis, considerando-se que o solo tem capacidade natural de atenuação do contaminante. Para os não degradáveis, é necessário uma diluição do fluxo principal, para diminuir a sua concentração. O mecanismo de diluição é predominantemente de advecção e dispersão, associados ao fluxo de água. Alguns contaminantes podem ser afetados por processos de degradação, adsorção e precipitação (Foster *et al.* 2006).

4.1- Proteção das águas subterrâneas

A delimitação de perímetro de proteção de uma captação de água, neste caso subterrânea, constitui uma ferramenta de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, tendo em vista a sua preservação quantitativa e qualitativa.

Angola ainda não tem uma Legislação que aborde sobre os Perímetros de proteção, por este motivo este trabalho enfoca sobre a Legislação portuguesa. Em Portugal, as captações de água subterrânea para abastecimento público de água para consumo humano, bem como a respetiva delimitação de perímetros de proteção, estão sujeitas ao disposto no Decreto-Lei n.º 382/99, e ao disposto no artigo 37.º da Lei da Água (Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro) assim como na Portaria n.º 702/2009.

Com a publicação do Decreto Lei n.º 382/99, de 22 de setembro, foram estabelecidas as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de proteção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. De acordo com este diploma, as entidades responsáveis pelas captações já existentes devem promover a delimitação dos perímetros de proteção, quer as captações se encontrem em exploração quer constituam uma reserva potencial de abastecimento de água subterrânea.

Todas as captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público são obrigadas à proteção definida de zona de proteção imediata embora o Decreto Lei n.º 382/99 se aplicar às captações de água subterrânea destinadas ao consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração é superior a 100m³/dia,

O perímetro de proteção é a área contígua à captação na qual se interditam ou condicionam as instalações e as atividades suscetíveis de poluírem as águas subterrâneas.

As zonas pertencentes a um perímetro de proteção de uma captação de água subterrânea são a zona de proteção imediata, a zona de proteção intermédia e a zona de proteção alargada, tal como ilustra a Figura 11.

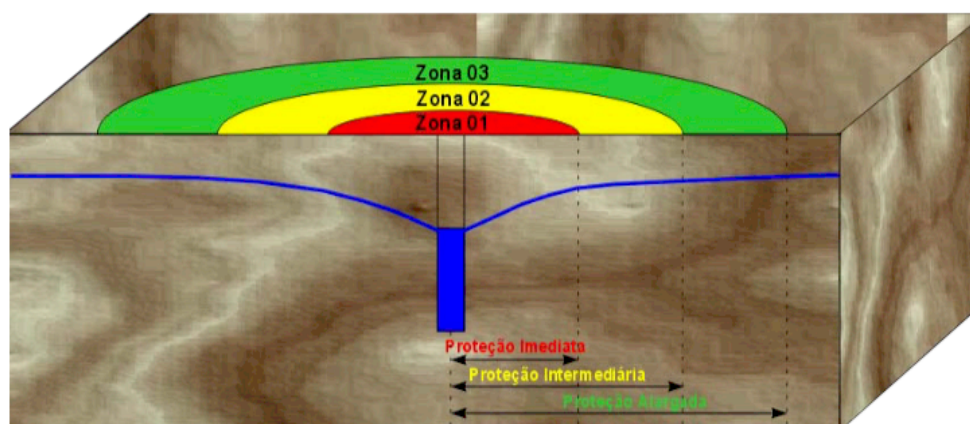


Figura 11- Desenho esquemático das zonas de proteção dos poços (adaptado de Krijgsman & Lobo Ferreira, 2001).

A **Zona de Proteção Imediata** é a zona mais próxima da captação, onde não é permitido qualquer tipo de funcionamento e/ou estabelecimento, exceto os que se relacionam com a

atividade da própria captação; na sua restrição pode ser usado um padrão temporal, por exemplo, um tempo de propagação de 24 horas (ITGE, 1991, *in* Moinante, 2003) ou um intervalo fixo espacial de pequeno alargamento.

A **Zona de Proteção Intermédia**, é a zona que abrange a anterior, com o papel de proteger o aquífero perante a poluição microbiológica, antes de esta atingir a captação; deve admitir, apesar de ser detetada a poluição, um período de resposta razoável para que sejam tomadas as medidas obrigatórias antes do poluente atingir a captação.

A **Zona de Proteção Alargada** é área da superfície do terreno contígua exterior à zona de proteção intermédia, destinada a proteger as águas subterrâneas de poluentes persistentes, tais como compostos orgânicos, substâncias radioativas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos, onde as atividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição das águas, tendo em atenção a natureza dos terrenos atravessados, a natureza e a quantidade de poluentes, bem como o modo de emissão desses poluentes.

Em aquíferos costeiros com risco de intrusão marinha, o perímetro de proteção inclui também zonas de proteção especiais como prevenção ao avanço da cunha salina, medidas sempre justificadas com estudos hidrogeológicos específicos (Laureano, 2012).

Os perímetros de proteção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público visam assim:

- Reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração das águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagens;
- Potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas.
- Prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes;
- Proporcionar a criação de sistemas de monitorização para a proteção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de água subterrânea, em situações de poluição accidental das águas.

Resumindo, é realizada a delimitação de perímetros de proteção aplicando métodos hidrogeológicos apropriados que tenham em conta os caudais de exploração, as condições da captação e as características do sistema aquífero explorado. A fixação dos caudais de exploração e o dimensionamento das captações de águas subterrâneas destinadas ao

abastecimento público têm de atender, necessariamente, aos aspetos económicos, já que a delimitação dos perímetros de proteção das captações impõe restrições ao uso do solo em áreas significativas que se traduzem em custos económicos que se repercutem sobre o custo da água na origem. De facto, não se afigura razoável delimitar áreas de proteção e restrições excessivas se tal não se traduzir em benefício efetivo das águas subterrâneas. Pelo que se tem de exigir que os perímetros de proteção sejam baseados em estudos hidrogeológicos suficientemente rigorosos para evidenciar a eficácia das medidas de proteção impostas (Decreto Lei n.º 382/99).

No Artº.6º. do Decreto-Lei nº 382/99 são definidas as servidões administrativas e restrições de utilidade pública nas diferentes zonas de proteção às captações: Na zona de proteção imediata é interdita qualquer instalação ou atividade, com exceção das que têm por finalidade a conservação, manutenção e melhor exploração da captação. Nesta zona o terreno é vedado e tem que ser mantido limpo de quaisquer resíduos, produtos ou líquidos que possam provocar infiltração de substâncias indesejáveis para a qualidade da água de captação. Na zona de proteção intermédia podem ser interditas ou condicionadas as seguintes atividades e instalações quando se demonstrem suscetíveis de provocarem a poluição das águas subterrâneas: a) pastorícia; b) usos agrícolas e pecuários; c) aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; d) edificações; e) estradas e caminhos de ferro; f) parques de campismo; g) espaços destinados a práticas desportivas; h) estações de tratamento de águas residuais; i) coletores de águas residuais; j) fossas de esgoto; l) unidades industriais. m) cemitérios; n) pedreiras e quaisquer escavações; o) explorações mineiras; p) lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias suscetíveis de se infiltrarem; q) depósitos de sucata. Na zona de proteção intermédia são interditas as seguintes atividades e instalações: a) infra estruturas aeronáuticas; b) oficinas e estações de serviço de automóveis; c) depósitos de materiais radioativos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; d) postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; e) transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioativos ou de outras substâncias perigosas; f) canalizações de produtos tóxicos; g) lixeiras e aterros sanitários.

Na zona de proteção alargada podem ser interditas ou condicionadas as seguintes atividades e instalações quando se demonstrem suscetíveis de provocarem a poluição das águas

subterrâneas: a) utilização de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; b) coletores de águas residuais; c) fossas de esgoto; d) lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias suscetíveis de se infiltrarem; e) estações de tratamento de águas residuais; f) cemitérios; g) pedreiras e explorações mineiras; h) infra estruturas aeronáuticas; i) oficinas e estações de serviço de automóveis; j) postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis; l) depósitos de sucata. Na zona de proteção alargada são interditas as seguintes atividades e instalações: a) transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioativos e de outras substâncias perigosas; b) depósitos de materiais radioativos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; c) canalizações de produtos tóxicos; d) refinarias e indústrias químicas; e) lixeiras e aterros sanitários.

4.2- Critérios

Os critérios utilizados para a delimitação de perímetros de proteção consistem na combinação de aspetos hidrogeológicos ou outros, de origem legal ou administrativa, relacionados na maioria das vezes com ocupação do solo. Para efetuar os processos de delimitação de perímetros de proteção devem ser considerados os seguintes critérios segundo (Lobo Ferreira *et al.*, 2009).

Distância: baseia-se na delimitação de uma área definida por um círculo cujo a captação se localiza no centro. É um critério simples e rápido mas não incorpora os fluxos da água subterrânea nem os processos de transporte de poluentes, o que pode resultar a uma proteção menos eficaz. Acaba por ser considerado como uma proteção de nível reduzido, sendo preferível a sua implementação à total inexistência de zonas de proteção. Normalmente é usada numa fase preparatória do estudo de delimitação dos perímetros de proteção.

Rebaixamento: neste critério o rebaixamento ocorre quando a água de um aquífero é sujeita a extração. É o termo aplicado à descida do nível piezométrico na vizinhança da captação, criando um gradiente que conduz a água até ao ponto de descarga. Este critério define o rebaixamento ou área de influência e deve-se ter em conta as direções de fluxo subterrâneo da água para acelerar a chegada do poluente à captação.

Tempo de propagação: este critério traduz o tempo que a água subterrânea e/ou um poluente demora a alcançar a captação, partindo de um ponto localizado no interior da zona de contribuição.

A legislação Portuguesa especifica o tempo de percurso em 50 dias para a zona de proteção intermédia e em 3.500 dias para a zona de proteção alargada relativamente às captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público no Decreto-Lei nº382/99.

Critérios hidrogeológicos: Estes critérios baseiam-se na definição da área geográfica que contribui com água para a captação com base nas divisórias hidrogeológicas e/ou em outras entidades físicas e hidrogeológicas que controlam o fluxo subterrâneo. Esta área geográfica corresponde à zona de contribuição da captação e poderá ser utilizada como zona de proteção partindo do princípio de que um poluente lançado nessa zona pode eventualmente alcançar a captação sob o gradiente hidráulico em questão.

Poder autodepurador do terreno/captação de assimilação: Este critério considera a capacidade que a secção saturada e/ou não saturada que o aquífero tem, para imobilizar ou atenuar a concentração dos poluentes que o atravessam, antes de alcançarem a captação. Essa atenuação é possível através de processos como a diluição, dispersão, absorção-adsorção, precipitação química ou degradação biológica, que atuam de modo diferente para cada poluente. Torna-se assim possível a determinação da extensão de terreno que o poluente tem que atravessar, até alcançar concentrações aceitáveis para o consumo humano.

4.3- Metodologias

As metodologias de delimitação de Perímetros de Proteção são diversas, a sua escolha dependerá do tipo de aquífero, do critério delimitador da informação e dos recursos disponíveis. A delimitação do perímetro de proteção deverá fundamentar-se em estudos que avaliem as características hidrogeológicas dos aquíferos, a vulnerabilidade à poluição das formações hidrogeológicas e o risco de poluição (Mendes, 2010).

A escolha do método a ser aplicado dependerá de diversos fatores como as características do local, o tempo de execução, os dados disponíveis, a experiência do usuário, entre outros aspetos. Essas áreas de proteção podem ser modificadas ao longo do tempo, já que o regime da água subterrânea é um sistema dinâmico e sua alteração pode envolver o surgimento de novos dados hidrogeológicos (Foster *et al.*, 2006).

Para a proteção eficaz das águas subterrâneas deve-se impedir a implantação de qualquer atividade e/ou instalação potencialmente poluente na área de recarga da captação. Mesmo estando melhor protegidas que as águas superficiais, as águas subterrâneas, quando contaminadas recuperam a sua qualidade muito lentamente e de forma mais dispendiosa. Além disso, quando um aquífero é comprometido torna-se difícil restabelecer a sua condição natural, mesmo que a fonte poluente já esteja inativa (Moinante, 2003).

4.3.1-Métodos geométricos

4.3.1.1- Método do Raio Fixo Arbitrário

Este método é relativamente simples e envolve a definição de uma área circular, com centro na captação cujo raio é escolhido de forma, mais ou menos, arbitrária. Essa escolha deve considerar as condições hidrogeológicas locais ou basear-se nas dimensões obtidas por outros métodos relativamente a outras captações existentes na mesma região (Lobo Ferreira *et al.*, 2009).

Este método permite a produção de formas simplificadas de perímetros de proteção com base nos critérios de fronteira de fluxo e tempo de propagação. Se a porosidade, condutividade hidráulica e espessura saturada do aquífero forem uniformes, em toda a área, as formas simplificadas são obtidas variando apenas o caudal de extração. Se as características do aquífero variarem, torna-se necessário utilizar diferentes combinações com os parâmetros do aquífero e caudal de extração (Laureano, 2012).

Apresenta como vantagem o facto de ser de aplicação bastante simples e rápida, ou seja, é facilmente aplicado e os custos de implementação são reduzidos, uma vez que não necessita de grande quantidade de informações nem grande experiência técnica.

4.3.2-Métodos Analíticos e Numéricos Simplificados

São geralmente os métodos mais utilizados pois possibilitam a comparação com outras metodologias de delimitação de perímetros de proteção. Apesar do grande número de simplificações quanto à geometria e às influências exteriores nas águas subterrâneas, os métodos analíticos possibilitam soluções minimamente adequadas (EPA, 1994).

No entanto estes métodos apresentam duas deficiências. A primeira resulta de considerarem uniformes as características do aquífero, não têm em consideração a existência de fronteiras hidrogeológicas (rios, lagos, canais), heterogeneidades no aquífero e a recarga. A segunda é a impossibilidade de calibração e validação do modelo, uma vez que, ao arbitrar determinada situação para o sistema, esta pode não representar a realidade (Laureano, 2012).

Nos modelos analíticos, a orientação do perímetro de proteção, baseia-se nos dados referentes a direção do fluxo de água subterrânea. Os parâmetros utilizados são originados de estudos regionais ou medições diretas do nível hidrostático em determinadas captações e em determinados momentos (Barbosa, 2007).

4.3.2.1- Método baseado na lei de Darcy

A lei de Darcy relaciona a velocidade linear de escoamento no aquífero poroso com o gradiente e a condutividade hidráulica. De todas as equações, é a mais simples para calcular o tempo de propagação de um poluente, desde o momento da infiltração até alcançar a zona de extração ou a captação (EPA, 1994).

$$v = \frac{K i}{n} \quad (1)$$

v= velocidade linear média ou velocidade real de escoamento
 (m/dia);

K= condutividade hidráulica horizontal (m/dia);

i= gradiente hidráulico horizontal;

n= porosidade eficaz.

Conhecida a velocidade média, pode ser calculado o tempo de propagação ao longo de uma determinada distância:

$$d = v \cdot t = \frac{k \cdot i \cdot t}{n} \quad (2)$$

d= distância percorrida (m);

v= velocidade linear média ou velocidade real de escoamento (m/dia);

t= tempo de propagação (dia);

K= condutividade hidráulica horizontal (m/dia);

i= gradiente hidráulico horizontal;

n= porosidade eficaz.

Ainda pode ser calculada a distância aos limites que definem o tempo de propagação:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d \cdot n}{K \cdot i} \quad (3)$$

d= distância da captação ao limite a proteger em relação ao tempo de propagação considerado necessário;

v= velocidade linear média ou velocidade real de escoamento (metros/dia);

t= tempo de propagação (dia);

K= condutividade hidráulica horizontal (m/dia);

i= gradiente hidráulico horizontal;

n= porosidade eficaz.

Esta equação é especialmente indicada para aquíferos porosos, não sendo adequada para meio fissurado ou carsificado. No caso dos aquíferos fraturados a lei só é válida se a densidade de fracturação permitir aproximações ao meio poroso. Pode usar-se em aquíferos confinados, com superfície piezométrica quase plana, ou em aquíferos livres, com superfície freática plana e pequeno rebaixamento relativamente à espessura saturada do aquífero ou com zona de ralos (< 10%). Pode ainda ser utilizada no cálculo do tempo de propagação de um poluente desde um ponto de entrada até um ponto a jusante da captação, mas apenas se as linhas equipotenciais forem aproximadamente espaçadas entre os dois pontos, isto é, se o

aquífero for homogéneo. A aplicação deste método implica uma razoável precisão na medição ou na estimativa da geometria do cone de rebaixamento (Laureano, 2012).

4.3.2.2- Método do Raio Fixo Calculado

Este método é relativamente simples e pouco dispendioso. O perímetro de proteção é definido a partir de uma equação volumétrica, que pode utilizar o tempo de propagação do poluente até à captação ou o rebaixamento do nível piezométrico.

Com relação ao tempo de propagação, a equação permite calcular o raio de uma secção cilíndrica do aquífero, centrada na captação e, com capacidade de conter o volume de água captada durante um determinado tempo de propagação, esse tempo é necessário para que o potencial poluente seja minimizado até apresentar concentrações seguras antes de alcançar a captação (Moinante, 2004). Este método considera, que a superfície piezométrica inicial é horizontal, a captação é a única a drenar do aquífero com caudal constante e que não existem direções preferenciais de fluxo, com todas as linhas de corrente a convergirem para a captação. (Figura 12).

Onde a porosidade eficaz é o único parâmetro hidrogeológico necessário aplicado segundo a equação volumétrica (4) cujo os valores se apresentam na Tabela 5.

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (4)$$

Q= caudal de exploração da captação (m³/dia);
t= tempo de propagação (dia);
n= porosidade eficaz do aquífero;
H = espessura saturada na zona da captação (m);
r= raio do perímetro de proteção.

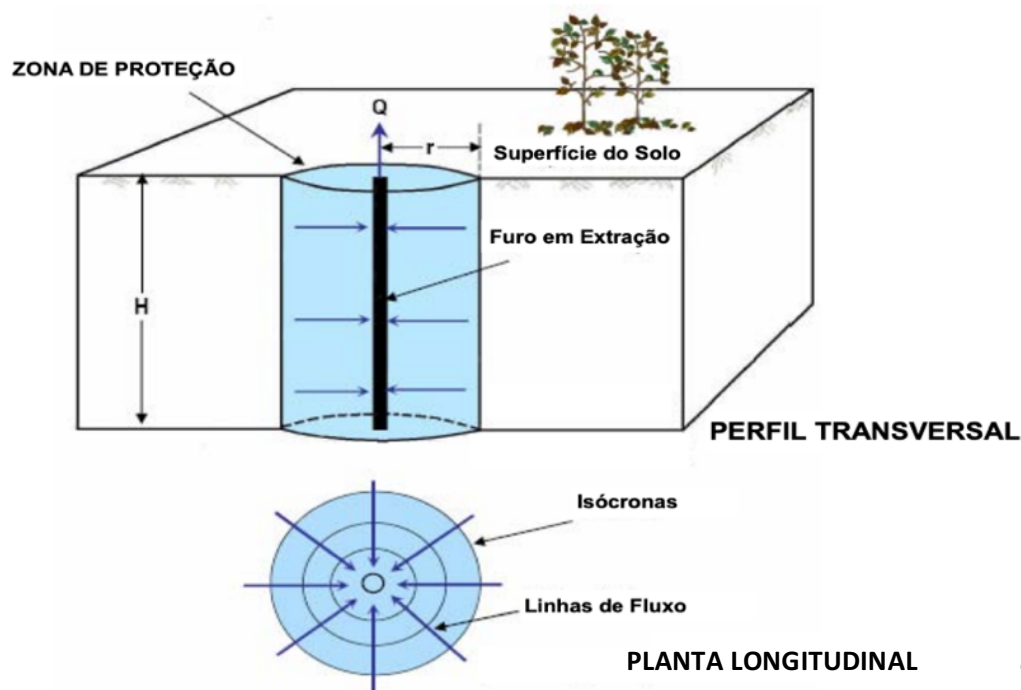


Figura 12- Definição de perímetro de proteção utilizando o método do raio fixo calculado (adaptado de Moinante, 2003).

Este método pode ser também calculado utilizando o rebaixamento do nível piezométrico em alternativa ao tempo de propagação. Neste caso a equação utilizada na aplicação deste método é a Equação de Theis (5) para regime variável:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

(5)

d= rebaixamento em um ponto a uma distância R da captação (m);

Q= caudal de extração constante (m³/dia);

T= transmissividade do aquífero (m²/dia).

Em que u é uma equação auxiliar (6) relacionada com a função do poço, $W(u)$, e possui a expressão seguinte:

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{u \cdot 4 \cdot T \cdot t}{S}} \quad (6)$$

r = raio da zona de proteção (m);
 S = coeficiente de armazenamento do aquífero;
 T = transmissividade do aquífero (m²/dia);
 t = tempo decorrido desde o início da extração (dia).

Definiu-se então uma função de poço, $W(u)$, que não apresentando solução analítica, é resolvida por aproximação:

$$W(u) = \frac{4 \cdot \pi \cdot T \cdot s}{Q} \quad (7)$$

T = transmissividade do aquífero (m²/dia);
 s = rebaixamento no ponto localizado a uma distância r da captação;
 Q = caudal de extração constante (m³/dia);

O método do raio fixo calculado, seja em função do tempo de propagação ou do rebaixamento, é um processo simples, pouco dispendioso, exige pouca experiência e os dados necessários estão quase sempre disponíveis. Porém, trata-se de um método pouco exato, uma vez que não considera todos os parâmetros hidrogeológicos que influenciam o transporte de poluentes, além de conduzir, na maioria das vezes, a uma área superior à obtida pelos restantes métodos (Laureano, 2012).

Em resumo, pode inferir-se que resultados obtidos pelo método do raio fixo calculado, aproximam-se tanto mais da realidade quanto mais se assemelhem os parâmetros físicos do caso estudado, das condições matemáticas impostas no modelo de cálculo. Essas condições são as seguintes (ITGE, 1991):

- Ausência de recargas anteriores;
- O aquífero é homogéneo e isotrópico em relação à permeabilidade;
- O aquífero é infinito em toda a sua extensão;

- A captação tem diâmetro igual a zero;
- A captação atravessa completamente o aquífero;
- A água captada é descarregada instantaneamente e não volta ao aquífero;
- O fluxo de água é radial em torno da captação, não existem componentes verticais;
- A superfície piezométrica regional é praticamente plana;
- O caudal de extração é constante.

Dependendo do tipo de sistema aquífero o Decreto-Lei nº.382/99, estabelece valores para o raio do perímetro de proteção da captação (Tabela 4) obtido da equação (4).

Tabela 4- Relação entre o raio dos perímetros de proteção com os tipos de aquífero (Fonte: Decreto-Lei 382/99)

Tipo de sistema aquífero	Zona de proteção imediata	Zona de proteção intermédia	Zona de proteção alargada
Tipo 1	$r = 20 \text{ m}$	r é o maior valor entre 40 m e r_1 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 350 m e r_1 (t=3500 dias)
Tipo 2	$r = 40 \text{ m}$	r é o maior valor entre 60 m e r_2 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 500 m e r_2 (t=3500 dias)
Tipo 3	$r = 30 \text{ m}$	r é o maior valor entre 50 m e r_3 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 400 m e r_3 (t=3500 dias)
Tipo 4	$r = 60 \text{ m}$	r é o maior valor entre 280 m e r_4 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 2400 m e r_4 (t=3500 dias)
Tipo 5	$r = 60 \text{ m}$	r é o maior valor entre 140 m e r_5 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 1200 m e r_5 (t=3500 dias)
Tipo 6	$r = 40 \text{ m}$	r é o maior valor entre 60 m e r_6 (t= 50 dias)	r é o maior valor entre 500 m e r_6 (t=3500 dias)

$$r_i(t) = \sqrt{\frac{Q \times t}{3,14 \times n \times H}}$$

r_i (t)= raio do perímetro de proteção (metros);

Q= caudal de exploração (metros cúbicos por dia);

t= tempo necessário para um poluente atingir a captação (dia);

n= porosidade eficaz (percentagem);

H= espessura saturada na captação (metros).

Sendo os seguintes tipos de sistemas aquíferos:

Tipo 1 – sistema aquífero confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 2 – sistema aquífero livre cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 3 – sistema aquífero semi-confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 4 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações carbonatadas;

Tipo 5 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas fissuradas;

Tipo 6 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas pouco fissuradas e ou alteradas.

Dependendo do tipo de rochas o Decreto-Lei nº.382/99 também estabelece valores referentes a porosidade eficaz (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de referência da porosidade eficaz. (Fonte: Decreto-Lei 382/99).

Material		Porosidade eficaz (percentagem)			Observações
Tipo	Descrição	Média	Máxima	Mínima	
Rochas maciças	Granito	< 0,2	0,5	0	(a)
	Calcário	< 0,5	1	0	(b)
	Dolomito	< 0,5	1	0	(b)
Rochas metamórficas	—	< 0,5	2	0	(a)
Rochas vulcânicas	Piroclastos	< 5	20	0	(c) (e)
	Escórias	20	50	1	(c) (e)
	Tufos vulcânicos	< 5	20	0	(d)
	Basaltos densos, fonólitos	< 1	2	0,1	(a)
	Basaltos vacuolares	5	10	1	(c)
Rochas sedimentares consolidadas.	Rochas foliadas	< 2	5	0	(e)
	Arenitos	10	20	0	(f)
	Calcário detrítico	3	20	0,5	—
Rochas sedimentares não consolidadas.	Aluviões	15	35	5	(e)
	Dunas	20	30	10	—
	Cascalheiras	25	35	15	—
	Areias	25	35	10	—
	Depósitos glaciares	15	30	5	—
	Lodos	10	20	2	(e)
	Argilas não compactadas	2	10	0	(e)
	Solos de cobertura	10	20	1	(e)

(a) A porosidade eficaz aumenta devido à meteorização.

(b) A porosidade eficaz aumenta devido a fenómenos de dissolução.

(c) A porosidade eficaz diminui com a idade.

(d) A porosidade eficaz pode aumentar com a idade.

(e) A porosidade eficaz varia muito segundo as circunstâncias e o tempo.

(f) A porosidade eficaz varia segundo o grau de cimentação e solubilidade.

4.3.2.3- Método da Equação do Fluxo Uniforme

A equação de fluxo uniforme tem sido bastante utilizada na delimitação de perímetros de proteção. A ocorrência de uma superfície piezométrica inclinada (Figura 13), gera um cone de rebaixamento assimétrico (EPA, 1994).

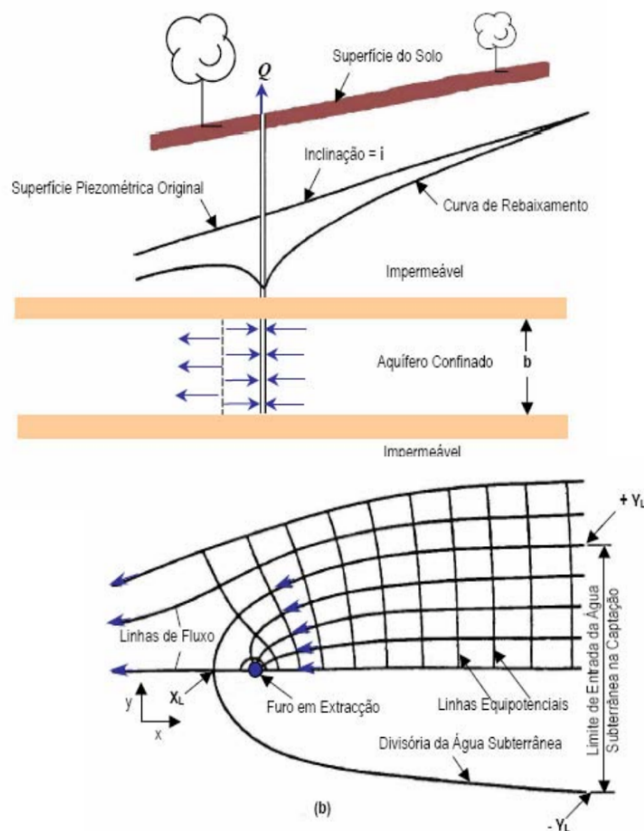


Figura 13- Definição do perímetro de proteção utilizando a equação de fluxo uniforme (Fonte: Moinante, 2003).

Pode também ser aplicada em aquíferos livres, utilizando a espessura saturada do aquífero e considerando que o rebaixamento é inferior a 10%, relativamente à espessura saturada. A equação geral (8), para a determinação da fronteira da região que produz entrada de fluxo, numa captação em extração, é a seguinte (Todd, 1980):

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2\pi.k.b.i}{Q}.Y\right) \quad (8)$$

X,Y= coordenadas;

Q= caudal de extração (m³/dia);

K= condutividade hidráulica (m/dia);

b= espessura saturada (m);

i= gradiente hidráulico.

A definição da zona de contribuição baseia-se em duas equações (9 e 10) derivadas da equação anterior, e que representam, respetivamente, a fronteira de fluxo a jusante e a largura máxima da zona de contribuição a montante.

$$XL = \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot b \cdot i} \quad (9)$$

X,Y= coordenadas;

Q= caudal de extração (m³/dia);

e

K= condutividade hidráulica (m/dia);

b= espessura saturada (m);

i= gradiente hidráulico

$$YL = \pm \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot b \cdot i} \quad (10)$$

4.3.2.4- Método da Equação do Equilíbrio de Thiem

Pela equação de equilíbrio de Thiem, o cálculo da distância de um determinado rebaixamento específico após alcançado o equilíbrio pode ser obtido da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot K \cdot b} \cdot \log e \frac{re}{r} \quad (11)$$

s= rebaixamento relativamente à superfície
piezométrica (m);

Q= descarga (m³/dia);

K= condutividade hidráulica (m/dia);

b= espessura do aquífero (m);

r= distância da captação ao rebaixamento (m);

re= distância da captação ao rebaixamento nulo do
cone de rebaixamento (m).

A utilização da equação de equilíbrio de Thiem pressupõe que:

- O aquífero é homogéneo e isotrópico;
- O aquífero é infinito na sua extensão (i.e. não existem fronteiras ao fluxo no interior do cone de rebaixamento);
- A superfície piezométrica regional é praticamente plana.

4.3.2.5- Método da Equação de Hoffman e Lillich

O método de Hoffman e Lillich é aplicável a meios homogéneos, onde se verifica um rebaixamento reduzido em relação à espessura do aquífero. Caso contrário, usa-se a equação de Todd (1964), a qual descreve o rebaixamento nas proximidades de uma captação num aquífero confinado, Figura 14 (Laureano, 2012):

$$h - h_w = (h_0 - h_w) \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (12)$$

h= nível piezométrico num determinado ponto (m);
ln= distância desse ponto à captação (m);
h₀= nível hidrodinâmico da captação (m);
h_w= nível hidroestático (m);
R= raio de influência (distância entre a captação e o rebaixamento nulo) (m);
r= raio da captação.

O objetivo deste método é encontrar a distância **l** para a qual o gradiente **i** assume um valor tal que, ao calcular a velocidade **V_e** e a distância **E** correspondente, se encontram os mesmos valores para **E** e para **l**. Trata-se portanto, de um processo iterativo dado que se vão atribuindo valores a **l** até que se obtenha um valor de **E** igual (Moinante, 2003).

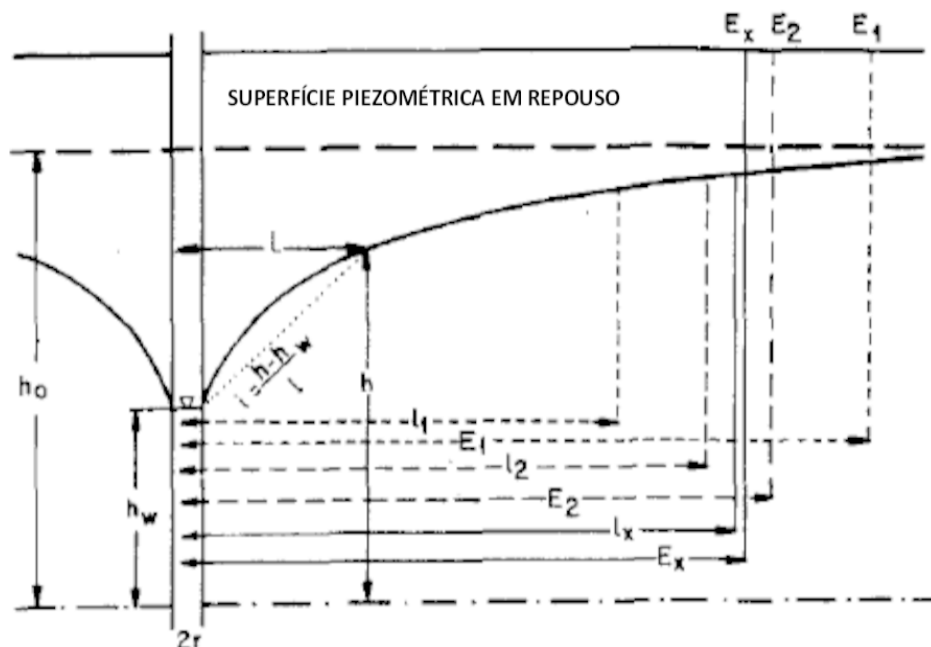


Figura 14- Determinação das isócronas por iteração (Fonte: Hoffman e Lillich, 1973).

4.3.2.6- Método de Wyssling (Gradiente Hidráulico Inclinado)

Esse método foi desenhado por Wyssling (ITGE, 1991) para otimização do Perímetro de Proteção que consiste no cálculo da zona de chamada de uma captação, admitindo aquíferos porosos homogêneos e procura posterior do tempo de propagação desejado.

É um método que apresenta, comparativamente ao do raio fixo calculado, medidas mais protecionistas a montante que a jusante da captação, o que se torna interessante pois coincide com a zona preferencial de recarga, mas apresenta como desvantagem o facto de não ter em conta as heterogeneidades do aquífero.

Se B for a largura da frente da zona de chamada- zona do aquífero na qual ocorre rebaixamento piezométrico e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação (Figura 15), num aquífero livre:

$$B = \frac{Q}{K \cdot b \cdot i} \quad (13)$$

Q= vazão de extração (m³/dia);

K= condutividade hidráulica (m/dia);

B= largura da zona de chamada;

b= espessura saturada do aquífero (m);

i= gradiente hidráulico (declive da superfície freática).

O raio de chamada X_0 (distância da captação ao ponto neutro a jusante) pode obter-se do seguinte modo:

$$X_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i} \quad (14)$$

e a largura B' da zona de chamada, medida na perpendicular à direção do fluxo que passa na captação, é:

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2 \cdot K \cdot b \cdot i} \quad (15)$$

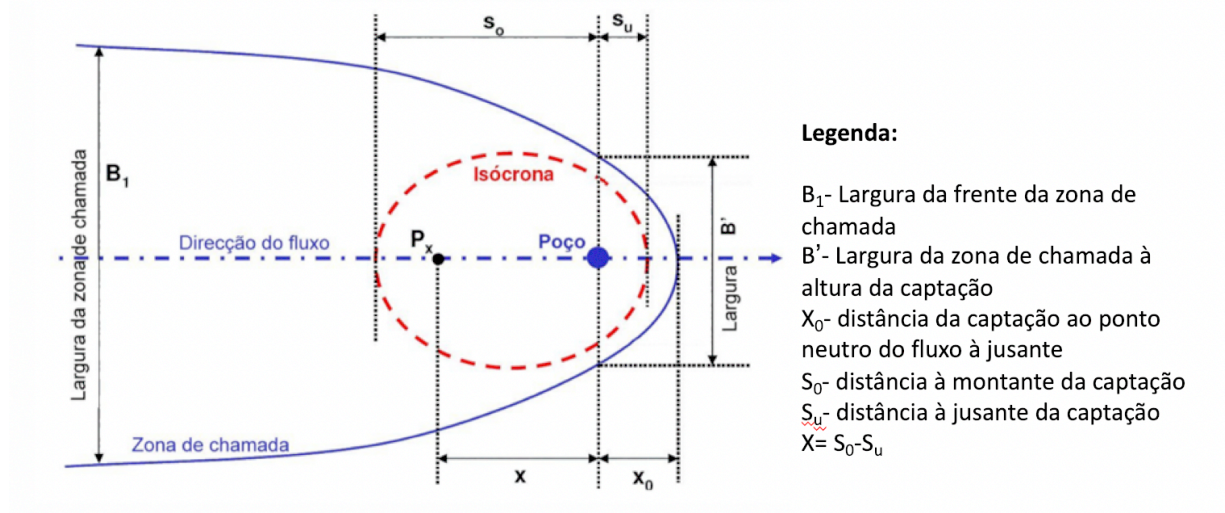


Figura 15- Método de Wyssling (Adaptado de ITGE, 1991). Extraído de Sousa, 2011.

Após a definição da zona de chamada é necessário determinar para o tempo de propagação pretendido na direção do fluxo, os seguintes parâmetros:

- Velocidade eficaz:

$$ve = \frac{K \cdot i}{n} \quad \text{ve – velocidade eficaz (m/dia)} \quad (16)$$

n – porosidade eficaz

- l para o tempo de propagação pretendido:

$$l = ve \cdot t \quad \text{t – tempo de propagação (dia)} \quad (17)$$

- Distância a montante da captação (na direção do fluxo):

$$S_0 = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} \quad \text{S}_0 \text{ – distância correspondente ao tempo t no} \\ \text{sentido do fluxo a montante da captação} \quad (18)$$

- Distância a jusante da captação (na direção do fluxo):

$$S_u = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} \quad \text{S}_u \text{ – distância correspondente ao tempo t no} \\ \text{sentido contrário do fluxo a jusante da captação} \quad (19)$$

4.3.2.7- Método das Formas Variadas Simplificadas

Este método faz uso de padrões simplificados de perímetros de proteção, obtidos através do recurso a métodos analíticos, onde se aplicam dois critérios fundamentais, tais como, fronteiras de fluxo e tempo de propagação (Moinante, 2003). Segundo esta autora, a forma da área de proteção utilizada é então orientada em torno da captação, de acordo com o padrão de fluxo hídrico subterrâneo, onde se calcula, inicialmente, a distância da captação até ao ponto neutro (a jusante), e também a extensão lateral das fronteiras de fluxo hídrico subterrâneo. Seguidamente, utiliza-se o tempo de propagação para determinar a sua extensão a montante da captação.

A aplicação deste método consiste na determinação da forma que melhor se ajusta à situação. Assim sendo, informações como: porosidade, condutividade hidráulica, transmissividade, etc., são muito importantes. Por exemplo, se estas propriedades forem uniformes em toda a área, as formas simplificadas são obtidas variando apenas o caudal de extração. Se, ao invés, as características hidráulicas do aquífero variarem, é necessário utilizar diferentes combinações de parâmetros do aquífero e caudais de extração. Apesar da relativa simplicidade do método, a sua eficácia diminui na presença de grandes heterogeneidades geológicas e de fronteiras hidrogeológicas não detectáveis.

A Figura 16 mostra um exemplo de aplicação de formas simplificadas.

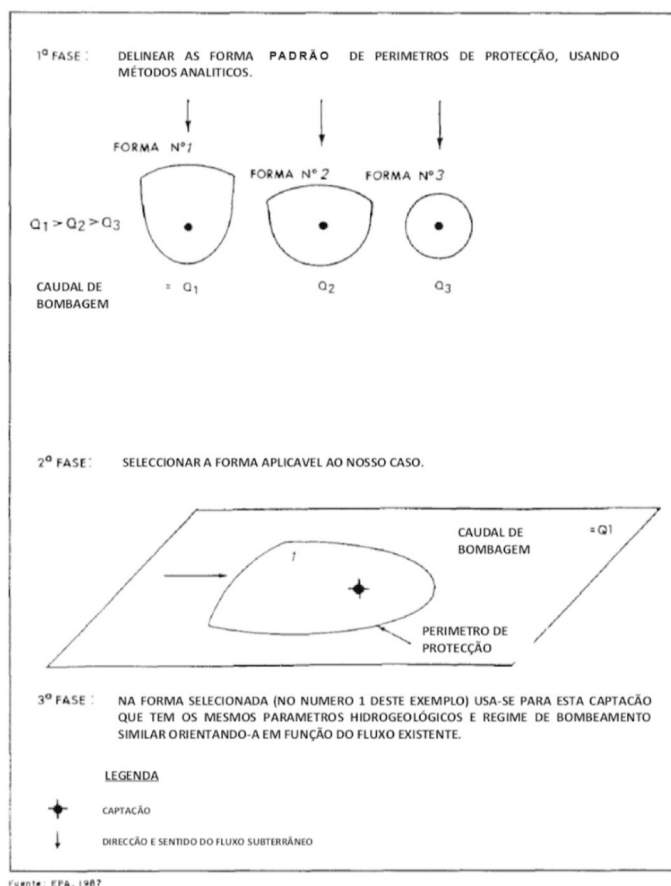


Figura 16- Exemplo de utilização de formas variáveis simplificadas (Fonte: EPA,1987).

4.3.3-Métodos numéricos

Como se verificou anteriormente, os modelos analíticos apresentam algumas limitações visto que, para facilitar a resolução das equações, é necessário efetuar algumas simplificações. O que provoca uma distorção da realidade originando condições homogêneas no interior do aquífero. Os modelos semi-analíticos oferecem informações relativas ao fluxo subterrâneo e ao tempo de propagação no espaço e no tempo, através de expressões numéricas ou analíticas. Estes dados são, efetivamente, bastante úteis na definição de perímetros de proteção de captações de águas subterrâneas. Assim tornam-se mais flexíveis, incorporando ao mesmo tempo variações hidrogeológicas e pressões externas, sem que para isso seja necessário acrescentar informações (EPA, 1994). No entanto, na maioria das vezes, os aquíferos não são homogêneos e os seus contornos não são polígonos regulares, de modo que se torna difícil ou impossível obter-se uma solução analítica. Surgiram então os métodos numéricos onde as equações diferenciais do fluxo subterrâneo são resolvidas utilizando técnicas de aproximação numérica obtidas através de discretização do aquífero e da solução de um sistema de equações com incógnitas obtidas da discretização (Feitosa, 1997).

Os modelos “puramente” numéricos apresentam-se matematicamente com maior complexidade que os anteriores, permitindo solucionar problemas também mais sofisticados. Para a sua aplicação, é necessário estabelecer uma malha sobre o sistema de água subterrânea em estudo, onde um conjunto de valores e parâmetros é atribuído em cada nó, escolhido aleatoriamente (como por exemplo, nível freático ou piezométrico, condutividade hidráulica, espessura do aquífero). Esta ação denomina-se discretizar. A malha constitui a base de uma matriz de equações a serem resolvidas. O programa permite a previsão das alterações que surgem ao longo do tempo, com base nas soluções desse sistema de equações (Moinante, 2003).

A utilização destes modelos justifica-se apenas nos casos em que existe informação suficiente para suportar as necessidades de dados do programa. Quando é necessário estimar grandes quantidades de parâmetros, os modelos analíticos fornecem o mesmo nível de precisão (Moinante, 2003).

Capítulo 5 – Enquadramento da área de estudo

5.1- Caracterização geográfica e ambiental

O presente caso de estudo encontra-se situado na província de Luanda. Luanda, que é a capital de Angola, ocupa uma área de 24.651 km² correspondente a aproximadamente 2% do território nacional, confinada pelo oceano Atlântico (a Oeste) e pelas províncias de Bengo (a Norte), Cuanza Norte (a Este) e Cuanza Sul (a Sul). Como aplicação e análise da metodologia sugerida para a delimitação de perímetros de proteção de águas subterrâneas, foram selecionados para o efeito quatro (4) captações, situadas no município de Luanda, Belas e no município de Viana (Figura 17).

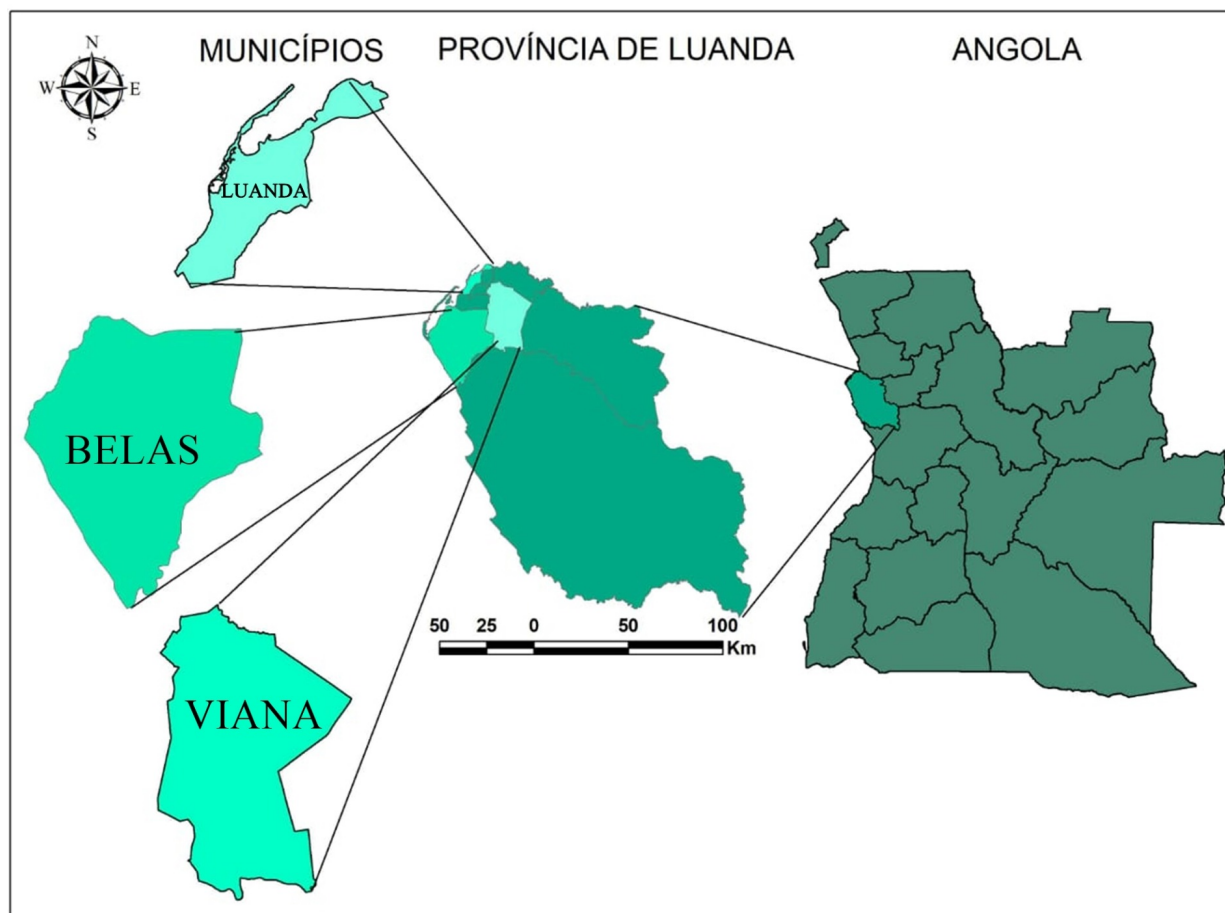


Figura 17- Localização geográfica da área de estudo

5.2- Clima

Segundo Palaque (1995), Angola está localizada na zona intertropical e subtropical sul. A proximidade em relação ao mar e, conseqüentemente, a corrente fria de Benguela - a qual exerce forte influência em toda região costeira sul; assim como também as características topográficas, são os fatores determinantes para a caracterização das duas principais estações climáticas no país.

A província de Luanda onde está inserida a área de estudo é caracterizada por um clima tropical quente e seco.

A temperatura média anual do ar é de cerca de 24,5°C, em que o valor máximo se verifica nos meses de Março e Abril atingindo valores na ordem dos 29°C à 31°C. Os meses mais frios são Junho, Julho e Agosto. Devido à grande evaporação das águas do mar, da latitude, assim como à influência da corrente fria de Benguela, a humidade relativa na capital é pouco variável e muito elevada apresentando um valor médio cerca de 80%. Para a Província de Luanda os valores de precipitação situam-se entre os 350-400 mm/ano, sendo o valor médio 367 mm/ano (Sicato *et. al.*, 2007).

Segundo a classificação de Köppen (Figura 18) Luanda está inserida na classificação de BSh (clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude).

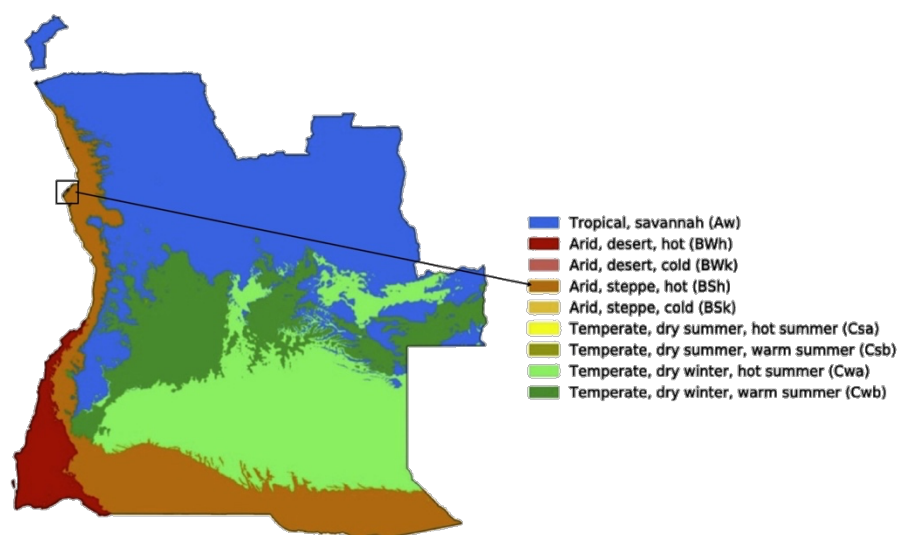


Figura 18- Clima da província de Luanda (extraído de Köppen-Geiger).

5.3- Vegetação

Os dados referentes a vegetação da área de estudo foram compilados através de informações extraídas maioritariamente das publicações feitas por Diniz e Aguiar (1966) e Diniz (1973). Segundo estes autores, na área de estudo aparecem distintas agrupações vegetais, quase todas denotando um xerofitismo mais ou menos acentuado, como consequência dos escassos volumes anuais de precipitações (158,6 mm média anual).

As características que mais se destacam da vegetação segundo os trabalhos de Diniz, consideram que os principais tipos de flora estão representados por estepes de gramíneas como (*Hyphaene gossweileri*), palmeiras representados na (Figura 19) e catos (*Aloé barbados*) com 10-15 cm de altura, arbustos espinhosos com 2 à 3m de altura.

Outras espécies bem características da área de estudo, estão representadas pelas savanas de *Setaria welwitschii*, formações arbóreo-arbustivas de *Sterculia*, *Euphorbia lingustroides*, embondeiros (*Adansonia digitata*), galerias florestais edáficas e balcados de *Strychnos* e gramíneas, Mangueiras (*Mangifer Índica*) e os cajueiros (*Anacardium occidental*) (Diniz e Aguiar, 1966).



Figura 19- Vegetação da área de estudo (com enfoque para as palmeiras).

5.4- Solos

Na área de estudo os solos mais representativos englobam o conjunto das principais características morfológicas e físicas dos diferentes termos como (musseque e catete) utilizado localmente para identificar os solos. Os termos foram generalizados para toda a parte sedimentar do litoral, onde quer que seja que o mesmo ocorra. Existe uma estreita correlação entre os principais tipos de solos e as rochas de que derivaram por este motivo e como consequência existe diferentes tipos de solos com composição mineralógica diferente, dos depósitos rochosos que afloram na orla sedimentar do litoral onde os mesmos ocorrem, os aspetos texturais vão desde textura grosseira a textura fina (Pereira, 2011).

Solos "musseques" caracterizam-se pela alta permeabilidade e de uma compactação e consistência muito baixa. Solo arenoso de cor vermelha (psamo-fersialíticos e psamo-rególicos) que constitui cerca de 85% da extensão total da mesma e se distribui na vasta plataforma Pleistocénica (*plateaux* de Luanda), (Miguel, 2006). Estes solos se apresentam de forma mais difusa na área de estudo. São localmente conhecidos por “areias de musseque” (Figura 20).



Figura 20- Solos "musseque".

É igualmente característico para a área, os solos denominados por Catete, que são representados pelos barros pretos e pardos (Diniz e Aguiar, 1966).

Estes solos “catetes” são pesados estão diretamente relacionados com rochas argilosas, calcárias e margosas. Os solos catete têm grande representação na bacia sedimentar do Cuanza, relacionando-se a sua ocorrência com formações sedimentares do Terciário e, dentro destas, mais diretamente com estratos argilosos, margas e calcários do Oligo-Miocénico e Miocénico Superior. Os solos “Catete” caracterizam-se por solos minerais, pardos ou cinzentos, negros quando húmido, argilosos, com fração mineral fina constituída por argilas expansíveis, principalmente do grupo das montemorilonites, por esta razão é que tais solos são muito pegajosos e plásticos quando húmidos, extremamente duros e fendilhando larga e profundamente quando secos. São solos de capacidade produtiva elevada, pela sua tenacidade são muito difíceis de trabalhar (Pereira, Maria 2011).

5.5- Geomorfologia

Segundo De Andrade (1997), a paisagem que domina a região de Luanda e arredores é essencialmente monótona, constituída por quatro ordens de superfícies que são terraçadas subplanejantes, que resultam de diversas fases de modelamento realizadas em longos intervalos de relativa ausência de movimentos tectónicos verticais.

A superfície mais ampla e contínua, de ordem II é geralmente designada como “terraço dos 100 m”, é suavemente ondulada com troços planares de inclinação muito baixa, contém raros “inselbergs” de alturas em torno de 10-20 m e corta as formações terciárias mais recentes: desta superfície apresenta cotas entre 70-90 m nos bordos externos adjacentes às áreas costeiras e penetra por mais de 50 km para o interior do continente, onde atinge cotas entre 150-170 m nos seus bordos mais internos (I ordem) que corta formações de idade Burdigliana á Este (E) da localidade de Bom Jesus.

Ao longo do bordo externo do terraço de II ordem (ou “terraço dos 100 m”), encontram-se troços de terraços de muito menor extensão e continuidade longitudinal, mal conservados, que constituem duas ordens de superfícies terraçadas situadas entre as cotas de 50-60m (superfície

de III ordem) e 12- 25 m (**superfície de IV ordem**), respetivamente:

A superfície de III ordem, situada entre 50-60m de cota, constitui uma paisagem erosional resultante da remodelação da superfície de II ordem, e é representada por formas de erosão fluviais (testemunhado pelo retículo hidrográfico, com vales suspensos de flancos suaves e baixo gradiente longitudinal que cortam as “Areias Vermelhas” e as “Areias Cinzentas” e se ligam – em alguns pontos de cotas mais baixas – a superfícies de abrasão marinha mais evidentes a cotas em torno de 50 m.

A superfície de IV ordem é constituída por terraços marinhos de cotas máximas em torno dos 20 m, representados por depósitos arenosos de ambiente marinho e por corpos flúvio-progradacionais presentes nas proximidades das costas baixas e nas adjacências das desembocaduras dos vales fluviais, e também por plataformas de abrasão que cortam o substrato nos troços de costa á falésia.

5.6- Enquadramento geológico regional e local

5.6.2-Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Cuanza

A Bacia do Cuanza é uma bacia cretácica e terciária que se estende por cerca de 300 km ao longo da costa oeste de Angola, em ambos os lados da foz do Rio Cuanza, entre o 8º e o 12º de latitude sul (Brognon & Verrier, 1965). Localiza-se no centro da margem continental angolana, sendo limitada a Norte pela Bacia do Baixo Congo e a Sul pela Bacia do Namibe (Figura 21). Ter-se-á formado durante o processo de rifte ligado à fraturação do supercontinente Pangeia, que na bacia em questão teve início no Neocomiano (cerca dos 144 – 140 Ma), e com a consequente separação das placas Africana e Sul Americana no Cretácico Inferior (cerca dos 127 – 117 Ma) (Hudec & Jackson, 2005). Este processo foi responsável nas margens análogas pela criação de bacias com evolução geológica similar como é o caso da Bacia do Cuanza (abrange a Sub-bacia de Benguela; Quesne et al., 2009) na margem angolana e as bacias de Campos e de Santos na margem brasileira (Mohriak, 2014; Figura 22).

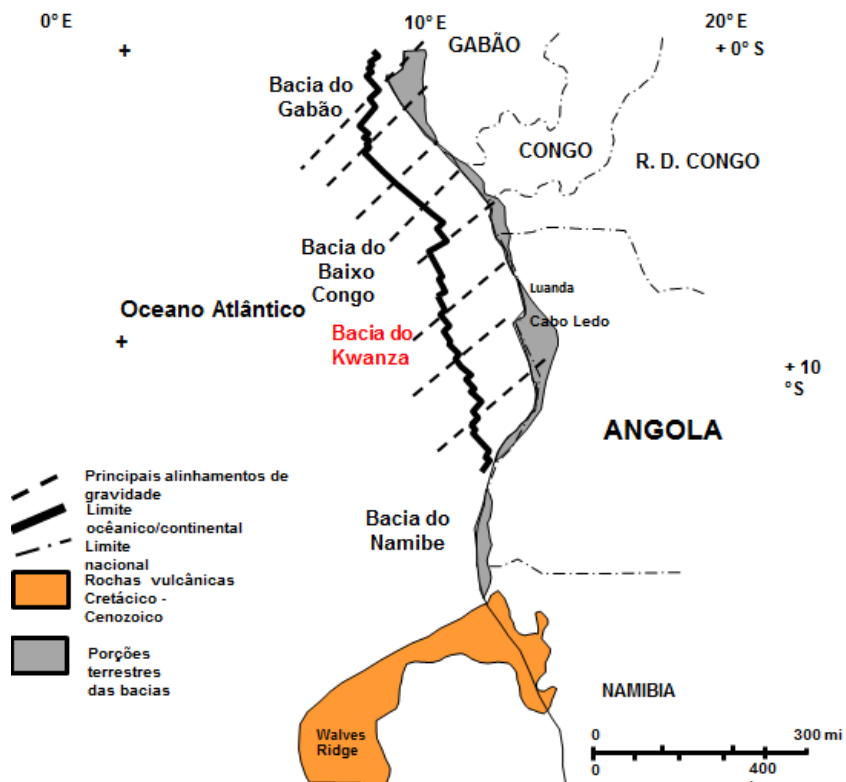


Figura 21- Localização das bacias sedimentares contíguas a Angola (modificado de Hudec & Jackson, 2005).

Segundo Brownfield & Charpentier (2006), a evolução tectónica da Bacia do Cuanza pode ser subdividida em três estágios principais: Pré-rifte (Proterozoico tardio a Jurássico tardio), Sin-rifte (Jurássico tardio a Cretácico Inicial) e Pós-rifte (Cretácico tardio a Holocénico).

Na Bacia do Cuanza, os sedimentos do Pré-rifte só muito recentemente foram alvo de sondagens, apresentando intercalações de chertes, dolomitos e calcários na sua parte imersa (Cazier *et al.*, 2014). Por outro lado, acredita-se que na porção continental as rochas do pré-rifte correspondam a arenitos e conglomerados basais (Brownfield & Charpentier, 2006). O preenchimento sedimentar da bacia ocorreu após o rifte continental devido à subsidência térmica da bacia do tipo *sag*, criando diferentes sequências deposicionais (Hudec & Jackson, 2005).

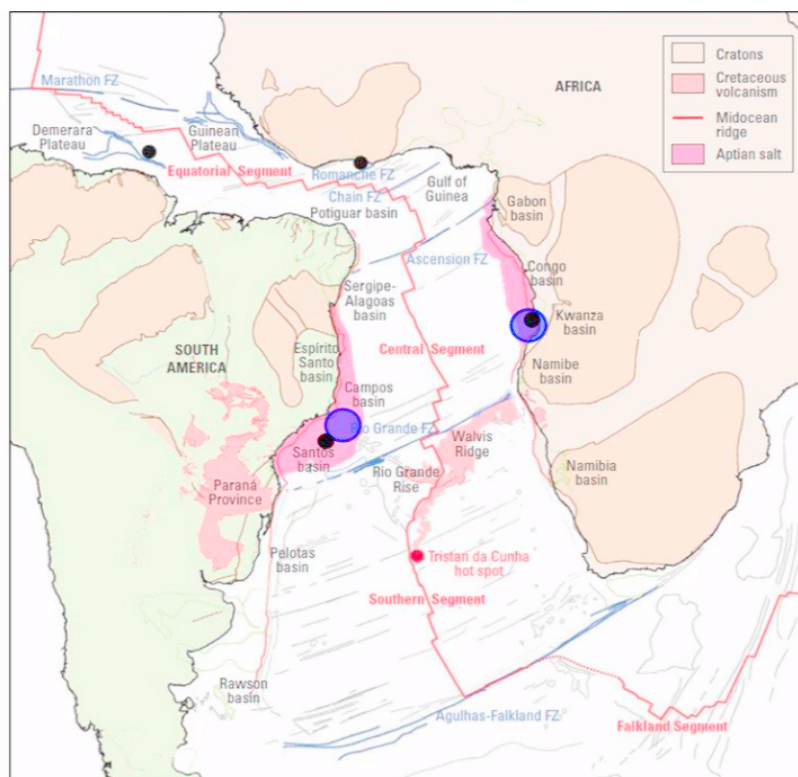


Figura 22- Margens conjugadas do Atlântico Sul, com bacias as conjugadas do Cuanza e de Santos representadas pelo círculo azul (Bryant et al., 2012).

No início do estágio Sin-rifte (Neocomaniano), o processo de rifte deu origem a uma série assimétrica de horts e grabens na bacia, com inclinação paralela à linha de costa actual, com a consequente deposição de espessas sequências de depósitos fluviais e lacustres ricos em matéria orgânica que são, por excelência, as rochas geradoras deste período (Stark, 1991; Brownfield & Charpentier, 2006). As rochas do Pós-rifte consistem, na fase inicial (Aptiano), em sedimentos continentais, fluviais e lagunares, seguindo-se a deposição de extensas sucessões evaporíticas (Brownfield & Charpentier, 2006). Após a deposição das unidades evaporíticas (Aptiano) estabeleceram-se dois regimes de deposição. Sendo o primeiro transgressivo, consistindo em rochas carbonatadas e clásticas de plataforma, seguido de unidades progradacionais ao longo da margem continental (Brownfield & Charpentier, 2006). O segundo regime estabeleceu-se em condições de mar aberto, caracterizado por unidades margosas e siliciclásticas desde o Cenomaniano (Hudec & Jackson, 2005).

Os depósitos do Santoniano ao Eocénico são caracterizados por sedimentos clásticos agradantes e retrogradantes intercalados com proporções variáveis de carbonatos, refletindo um período de nível de mar alto no Cretácico Superior (Anderson et al., 2000) . As condições de mar aberto cessam no Paleocénico – Eocénico, onde se verifica uma descida do nível do mar, dando lugar ao avanço da deposição de depósitos siliciclásticos continentais para oeste, cobrindo os depósitos marinhos (Stark, 1991). Do início do Eocénico ao final do Miocénico foi um período marcado por uma grande descida do nível do mar e ausência de depósitos, dando origem a fragmentação por erosão de grandes volumes rochosos, que se foram depositar na plataforma continental, o que deu lugar a uma sobrelevação e inclinação da margem para ocidente. Com a contínua regressão marinha do Cenozoico verificou-se a deposição de sedimentos siliciclásticos continentais do Pliocénico e Plistocénico em toda a bacia (Stark, 1991).

5.7- Enquadramento geológico local

Segundo a carta geológica da bacia do Cuanza (Total e Sonangol/1968 – 1972) a área de estudo, localiza-se na bacia sedimentar do Cuanza e caracteriza-se pelas seguintes formações da base ao topo (Figura 23):

- Oligocénico

Formação Quifangondo: Margas e argila com nódulos.

- Miocénico - Pliocénico

Formação Luanda - Cacuaco: Margas, argilas, calcário e grés.

- Quaternário

Formação Quelo: Areias vermelhas.

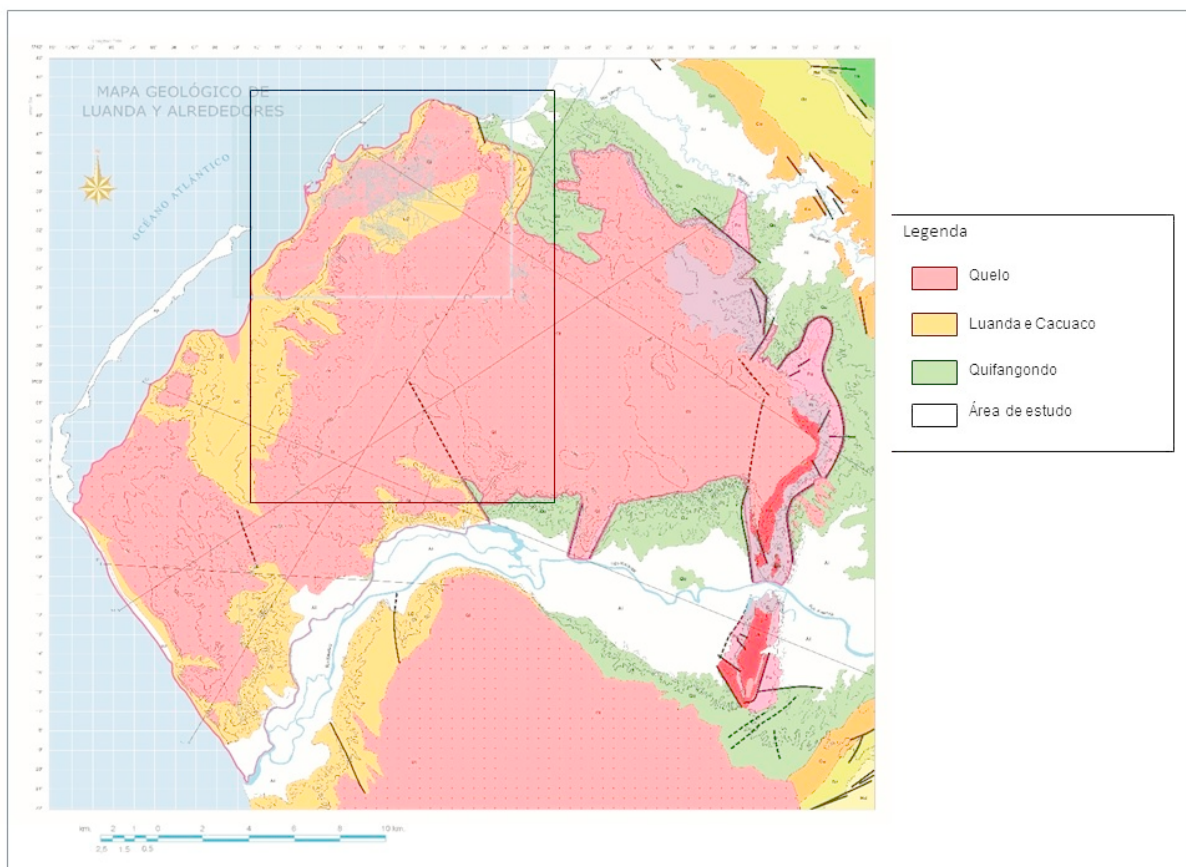


Figura 23- Mapa geológico de área de estudo (elaborado a partir da cartografia da Total e Sonangol 1968-1987, modificado por Miguel, 2006).

Quanto as sequências estratigráficas, na Bacia do Cuanza elas estão representadas pelas sequências pré-salífera e pós-salífera. Estas sequências encontram-se separadas por uma sequência salífera de espessura variável, marcando a passagem de condições de deposição continental para condições de deposição predominantemente marinha (Stark, 1991; Figura 24).

Têm sido várias as contribuições litostratigráficas apresentadas ao longo dos anos para o enchimento da Bacia do Cuanza, onde se inclui a Sub-bacia de Benguela (Neto, 1961; Brognon & Verrier, 1965; Lapão & Pereira, 1971; Quesne et al., 2009, Guiraud et al., 2010; Cazier et al., 2014; Segundo et al., 2014). A complexa organização espacial das unidades, aliada à tectónica e ao fraco conhecimento detalhado da sucessão sedimentar da Bacia do Cuanza, tem levado à apresentação de colunas estratigráficas por vezes discrepantes. A título de exemplo, Brognon &

Verrier (1965), Stark (1991), Brownfield & Charpentier (2006) não fazem referência à Formação Quelo do Pliocénico – Plistocénico. Guiraud *et al.* (2010) reconhecem a presença de depósitos continentais no intervalo em questão mas não referem a formação considerando o intervalo como uma lacuna. Por outro lado, Hudec & Jackson (2002) atribuem o intervalo à Formação Quelo, constituída por depósitos arenosos. Outros pontos de divergência incluem a posição estratigráfica das formações carbonatadas do Albiano que representam equivalentes laterais, e também a idade estratigráfica de algumas formações. A Figura 24 resume o quadro litostratigráfico assumido no presente trabalho, bem como as unidades a seguir descritas de modo sumário.

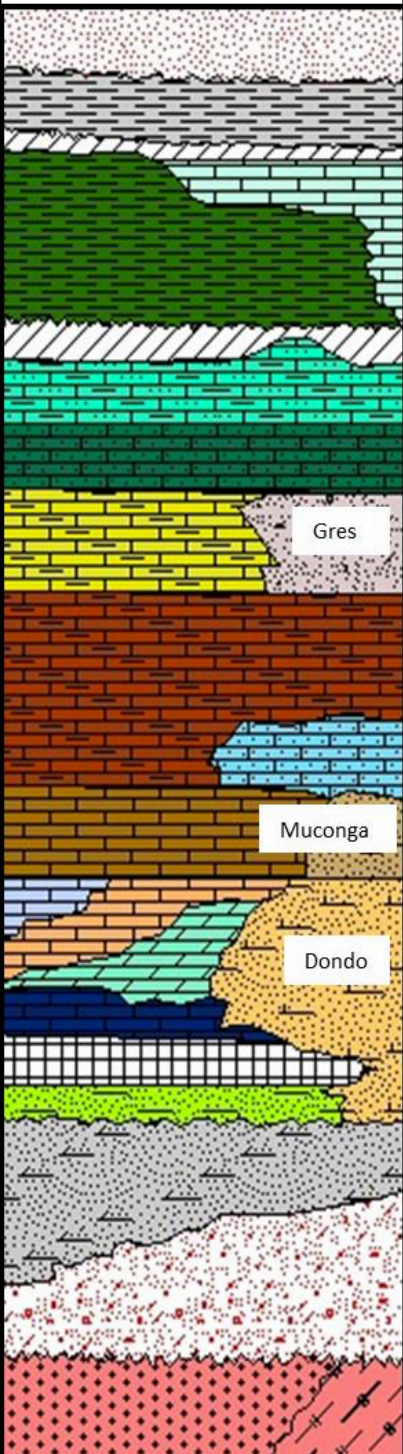
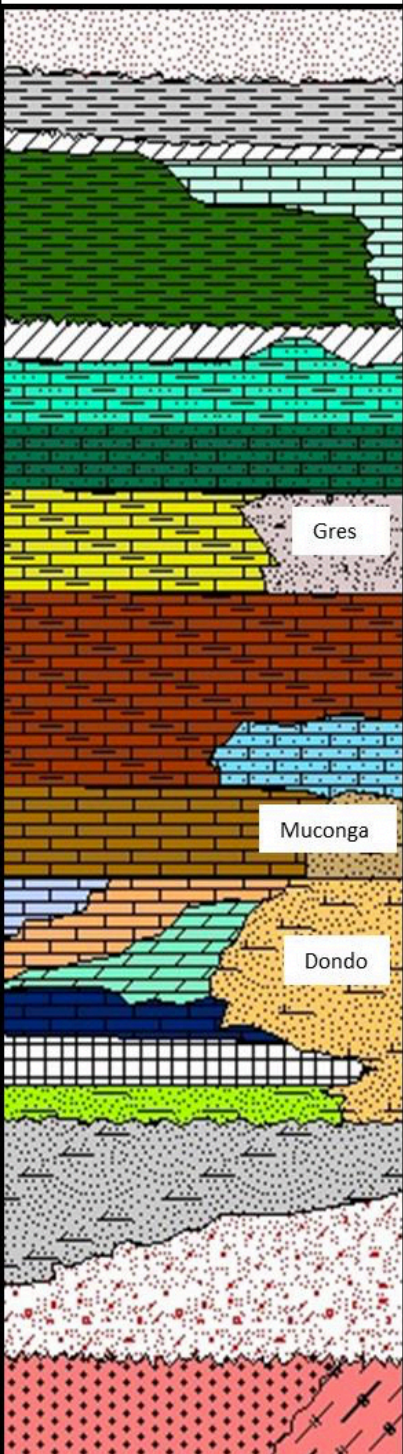
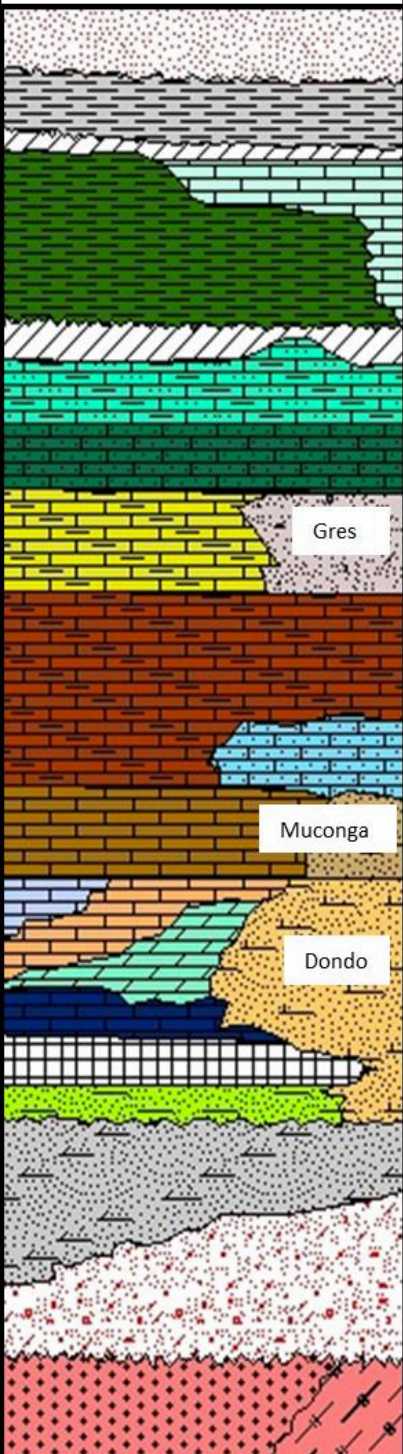
Idade	Estágio	O	Litologia	E	Formação	Litologia
Pleistocénico	Pós-Rifte				Quelo	Arenitos ferruginosos
Pliocénico					Luanda	Margas, arenitos e arenitos calcários
Miocénico					Cacuaco	Margas argilosas gipsíferas e arenitos calcários
Oligocénico					Quifangondo	Argilitos negros, margas gipsíferas, dolomitos e calcários fossilíferos
Eocénico					Cunga-Gratidão	Calcários pelágicos e argilitos
Paleocénico					Rio Dande	Margas, calcários gresosos e siltosos
Maastrichtiano					Teba	Margas e calcários lumachélicos
Campaniano						
Santoniano					N'golome	Argilitos castanhos
Coniaciano					Itombe	Calcários, arenitos, siltitos, e argilitos siltosos.
Turoniano						
Cenomaniano					Cabo Ledo	Argilitos siltosos, calcários e argilitos betuminosos
Albiano					Quissonde	Margas calcárias
					Catumbela	Calcários calciclásticos.
					Tuenza	Dolomitos arenitos .
					Binga	Carbonatos micríticos
Aptiano					Sal Massivo	Halite e anidrite
					Chela	arenitos
Barremiano	Sin-Rifte		Cuvo Superior	Bancos dolomíticos siltosos, grés finos, calcário lumachélicos.		
Neocomaniano					Cuvo Inferior	Grés arcósicos ou conglomeráticos, fragmentos vulcânicos e veios basáticos.
Pré-Câmbrico	Pré-Rifte				Soco	Rochas cristalinas e metamórficas

Figura 24- Coluna litostratigráfica da Bacia do Cuanza, com base nos dados de Brognon & Verrier (1965), Stark (1991), Quesne et al. (2009) e Guiraud et al. (2010).

- Sequência pré-salífera

Repousa sobre o soco cristalino pré-câmbrico, polifásico, constituído por rochas cristalinas e metamórficas (*Stark, 1991*). Estão representadas nesta sequência fácies continentais, laguno-deltaicas, litorais e sub-litorais (*Brognon & Verrier, 1965*). Envolve as seguintes duas formações:

-Formação Cuvo inferior (Neocomaniano): formado por conglomerados, que apresentam fragmentos de rochas gnáissicas e outras metamórficas do soco cristalino, bem como arenitos (possivelmente de cor vermelho), cujo ambiente é fluvial ou lacustre.

-Formação Cuvo superior (Barremiano - Aptiano): constituído por arenitos (grosseiros ou finos) com intercalações de calcários conquíferos normalmente ricos em ostracodos, de ambiente lagunar com uma evolução para fácies marinhas. De potencial enquanto rocha reservatório do pré-sal bem como rocha reservatório.

- Sequência salífera

Engloba um conjunto de formações do Aptiano e Albiano que chegam a atingir uma espessura na ordem dos 1500 m na parte central da bacia continental. Lateralmente, consistem em fácies detríticas a este, e carbonatadas a oeste (*Stark, 1991*). Esta sequência engloba as seguintes unidades:

-Formação Sal Massivo (Aptiano): constituída por dolomite, anidrite dolomítica, e anidrite ou Halite. Esta sequência foi depositada num ambiente lagunar ao marinho.

-Formação Binga (Aptiano-Albiano): formada por calcários oolíticos e bioclastos, calcários sublitográficos com dolomite microcristalina e anidrite, depositada num ambiente lagunar da plataforma continental.

-Formação Tuenza (Albiano): representada por dolomites com ocorrência de anidrite por vezes com intercalações de evaporitos. Esta formação depositada num ambiente lagunar.

- Sequência pós-salífera

As formações pós-salíferas ilustram as condições marinhas cada vez mais profundas que dominaram a bacia. Depósitos arenosos, continentais ou litorais, acentuam a orla oriental da bacia. A sedimentação bacinal é constituída, sobretudo, por calcários margosos e por margas pelágicas (*Stark, 1991*). Envolve as seguintes unidades:

-Formação Catumbela (Albiano): composta por calcarenitos e calcários marinhos com algas e corais, bioclásticos, pisólitos, fragmentos arredondados e calcarenitos conquíferos, depositada num ambiente marinho pouco profundo (plataforma);

-Formação Quissonde (Albiano): depositada num ambiente de plataforma externa constituída por calcários margosos com fragmentos de conchas na base, e fragmentos de conchas na parte média e no topo;

-Formação Cabo Ledo (Cenomaniano): caracteriza-se pela dominância das margas sobre os calcários conquíferos. Depositada num ambiente marinho de grande profundidade cuja idade é Cenomaniana;

-Formação Itombe (Turoniano - Coniaciano): constituída por margas calcárias com amonites e intercalações arenosas. Esta formação foi depositada num ambiente de mar pouco profundo;

-Formação N'golome (Coniaciano – Santoniano): constituída por margas pelágicas caracterizada pelo seu conteúdo em microfósseis (*Globotruncana*);

-Formação Teba (Campaniano - Maastrichiano): constituída por margas com calcários lumachélicos e restos de *Inoceramus* com níveis fosfatados. Depositou-se num ambiente de plataforma;

-Formação Rio Dande (Paleocénico): constituída por margas castanhas e ocreas que se intercalam com calcários gresosos ou siltosos (*Brognon & Verrier, 1965*);

-Formação Cunga-Gratidão (Eocénico): constituída por margas gresosas com lentilhas e concreções calcárias e calcários silicificados. Depositadas num ambiente pelágico;

-Formação Quifangondo (Aquitano): representada por argilas com intercalações siltosas, calcários gresosos lumachélicos; e ricas em foraminíferos, depositada em ambientes de

plataforma externa a batial;

-Formação Cacuaco (Miocénico superior): constituída por calcários com algas, equinoderme e bivalves, com calcarenitos; depositados num ambiente litoral a circo litoral;

-Formação Luanda (Pliocénico): composta por margas castanhas com foraminíferos, areias litorais e grés com conchas, depositada num ambiente litoral;

-Formação Quelo (Plistocénico): constituída predominantemente por depósitos arenosos de granulometria fina a média, de cor vermelha ferralitizadas, moderadamente a pobremente selecionada com percentuais baixos de matriz argilosa. É interpretado como produto de reelaboração em ambiente continental e considerado como depósitos recentes.

A formação Quelo (Figura 25) ocupa mais de 70% da extensão superficial da zona de estudo, em particular, serve de cobertura para a parte mais alta da cidade de Luanda.



Figura 25- Aspectos da formação Quelo

5.8- Caracterização hidrogeológica

Diz-se que as sucessões estratigráficas em volta de Luanda estão definidas por quatro formações principais que são: Quelo, Luanda, Cacuaco e Quifangondo de cima para baixo, estas se dispõem de forma subhorizontal com um ligeiro basculamento a Sudoeste (SW). O sistema aquífero Quelo-Luanda, é um sistema aquífero livre de idade compreendida entre o Pliocénico inferior e o Holocénico, é constituído por materiais detríticos com permeabilidade de 1-3 m/d (em particular nos sectores basais do mesmo); valores que contrastam com a notável e reduzida permeabilidade da formação Quifangondo (Burdigaliano) sobre o qual assenta (Miguel *et al.*, 2005). A litoestratigrafia dos materiais que constituem o sistema aquífero Quelo-Luanda está composta por argilas cinzentas e esverdeadas, com lentes milimétricas e descontínuas de areias amareladas muito finas; alternância de limos e areias fina de cor branca e amarelada, as vezes ferruginosas com pouca argila; areias finas, médias, grosseiras e heterométricas; alternância de conglomerados e areias principalmente quartzosas moderada e pobremente selecionadas com uma percentagem muito baixa de matriz argilosa, formada por caulinite, illite e abundantes óxidos de ferro.

Os valores de permeabilidade obtidos em laboratório para as fácies mais representativas das formações Quelo e Luanda permitem concluir que ambas unidades se comportam de forma semelhante, no que diz respeito ao movimento das águas subterrâneas (Miguel, 2006). A grande extensão da formação Quelo e a considerável espessura da formação Luanda em alguns sectores, comparados com os que mostra a formação Cacuaco, são os fatores pelos quais (Miguel *et. al.*, 2002) atribuem ao sistema aquífero investigado o nome de Quelo-Luanda. Este se encontra limitado em profundidade pelo teto da formação Quifangondo, que atua como base “impermeável” do sistema hidrogeológico. O conjunto deste sistema poderia funcionar como um sistema “multicamada” na qual, devido as numerosas variações laterais e vertical de fácies, a heterogeneidade joga importante papel. Isto supõe que as previsões e diagnósticos hidrogeológicos sobre situações concretas e pontuais poderiam não corresponder as pautas gerais do comportamento da água subterrânea no sistema (Miguel *et. al.*, 2005).

Capítulo 6- Caso de estudo

O presente caso de estudo localiza-se na província de Luanda. Luanda que é a capital de Angola e muito importante tanto pela sua história, carácter administrativo e suas dimensões bem como pelo número da sua população. Como aplicação e análise da metodologia sugerida para a delimitação de perímetro de proteção de águas subterrâneas, foram selecionados para o efeito quatro (4) poços situados no município de Luanda, Belas e Viana (Figura 26).



Figura 26- Localização das captações.

Nessas áreas estão incluídas atividades que de alguma forma estão relacionadas com o desenvolvimento urbano, como: edifícios, estradas, obras de escavação, postos de combustível e serviços, lixeiras, aterros sanitários, cemitérios, parques de estacionamento, oficinas de

veículos, entre outros. O potencial de geração de carga contaminante causada por essas atividades é bastante variável, a depender de cada tipo.

Para a concretização dos objetivos deste trabalho, começou-se o levantamento de dados em falta fazendo um levantamento de poços na referida área de estudo, no entanto não se obtiveram grandes informações porque algumas captações são bastante antigas e não existe qualquer tipo de projeto da sua construção ou da construção da infra-estrutura de proteção; outras captações são particulares e houve dificuldade em aceder informações necessárias. Alguns dos dados foram obtidos com visita ao local das captações e outros através de relatórios técnicos de algumas captações por uma ida as respetivas áreas onde estão inseridas tais captações.

6.1- Área 1 – Estaleiro Central, Semente Viva

Os poços da Área 1 estão localizados na província de Luanda, município de Luanda, distrito do Ngola Kiluanje. O mesmo ocupa uma superfície de 64 000 m², na qual é numa unidade de prestação de serviços e armazenamento de materiais de construção. O regime de exploração das duas captações de água subterrânea existentes nas instalações é de: 7 dias por semana, 4 horas por dia, durante todo ano, mediante o uso de bomba elétrica submersível com capacidade de extração de 2,22 L/s e uma potência de 7,5 cv. A granulometria dos depósitos associados a esses poços varia entre areias finas, médias, grosseiras e argilas. A recarga desses aquíferos ocorre por meio de infiltração de águas da chuva através do seu domínio poroso. O caudal extraído de cada um dos furos é de 8 m³/h.

O sistema de captação no Estaleiro Central da Semente Viva dispõe de duas Estações de Tratamento de Água (ETA), onde a água é aproveitada para o consumo dos funcionários e execução das atividades internas como construção de obras, lavagem de viaturas, limpeza, irrigação, lavagem de vestuários e materiais domésticos.

O poços estão ilustrados nas Figura 27 e 28. A Tabela 6 ilustra tanto as coordenadas geográficas como a profundidade de ambos.

O perfil litológico dos furos encontra-se no Anexo I.



Figura 27- Poço 1 de água do Estaleiro Central, Semente Viva.



Figura 28 - Poço 2 de água do Estaleiro Central, Semente Viva.

Tabela 6- Localização de do poço 1 e poço 2.

ID	Designação	Latitude (S) / Longitude (E)	Profundidade (m)
1	Poço 1	08° 46' 13.56" / 13° 18' 06.72"	110
2	Poço 2	08° 46' 12.90" / 13° 18' 19.62"	140

6.2- Área 2 – Zona Industrial de Viana, Semente Viva

O poço da Área 2 está localizado na província de Luanda, especificamente na Zona Industrial de Viana, dentro de uma fábrica de Sabão. A mesma ocupa uma superfície de 30 000 m², na qual funciona a fábrica e a captação de água subterrânea. O regime de exploração desta captação de água subterrânea é de: 5 dias por semana, 4 horas por dia, durante todo ano, mediante o uso de bomba elétrica com uma potência de 1,40 kW. A granulometria desses poços varia entre areias finas, grosseiras e argilas. A recarga desses aquíferos ocorre por meio de infiltração de águas da chuva através do seu domínio poroso. O caudal do furo é de 5 m³/h.

Na fábrica de Sabão e Sabonete da empresa Semente viva, a água é usada essencialmente para a diluição da soda cáustica, que é usada na fabricação de sabão e sabonete. Também é usada para os balneários dentro das instalações.

A Figura 29 ilustra o poço e a Tabela 7 tanto as coordenadas geográficas como a profundidade do poço.

O perfil litológico dos furos encontra-se nos Anexos I.



Figura 29- Poço 3 de água da Zona Industrial de Viana.

Tabela 7- Localização do poço 3.

ID	Designação	Latitude (S) / Longitude (E)	Profundidade (m)
3	Poço 3	8° 55' 36.30" / 13° 23' 26.51"	156

6.3- Área 3 – Bitá Tanque

O poço da Área 3 está localizado na província de Luanda, especificamente no Bitá Tanque, situado no município de Belas, dentro de uma propriedade privada.

Este poço na altura da visita de campo estava a ser feito, sendo a posterior visitado novamente. A previsão do regime de exploração desta captação de água subterrânea é de 7 dias por semana, 5 horas por dia, durante todo ano, mediante o uso de bomba elétrica submersível com uma capacidade de 3,5 kW. A granulometria dos depósitos associados a esses poços varia entre areias finas, médias, grosseiras e argilas. A recarga desses aquíferos ocorre por meio de infiltração de águas da chuva através do seu domínio poroso. O caudal extraído de cada um dos furos é de 8 m³/h.

A Figura 30 ilustra o poço e a Tabela 8 tanto as coordenadas geográficas como a profundidade do poço.

Não foi possível aceder ao perfil litológico deste poço, no entanto os dados foram obtidos através do responsável pelo controle desta captação.



Figura 30- Poço 4 de água do Bita Tanque.

Tabela 8- Localização do poço 4.

ID	Designação	Latitude (S) / Longitude (E)	Profundidade (m)
4	Poço 4	9° 08' 27.20" / 13° 14' 39.90"	123

6.4- Vulnerabilidade à poluição – aplicação do Índice DRASTIC

O conhecimento da vulnerabilidade, de um sistema aquífero à poluição, é muito importante para a utilização correta do solo em torno desse sistema aquífero. Se um aquífero apresentar um valor de vulnerabilidade à poluição muito alto, é necessário condicionar qualquer empreendimento que possa afetar esse aquífero e, em situações extremas, o aquífero pode ser considerado com um qualquer estatuto de proteção, para garantir uma melhor da qualidade da água subterrânea (LNEC, 2009).

Para a caracterização da vulnerabilidade à poluição da zona em estudo, aplicou-se o Índice DRASTIC e o Índice de GOD para as formações geológicas. Uma vez que se trata do mesmo sistema aquífero achou-se relevante aplicar o método apenas a Área 1.

Para a aplicação desta metodologia, foram atribuídos valores relativamente à caracterização dos parâmetros dos poços da área 1, para o parâmetro **D** atribuiu-se o valor de 80m, para o parâmetro **R** utilizou-se a bibliografia de (Miguel, 2006) tendo como resultado uma taxa de infiltração de 249mm³/ano. Para o parâmetro **A** foi utilizado as características dos poços, sendo eles constituídos maioritariamente por areias e de igual modo o parâmetro **S**. Para o parâmetro **T** foram utilizados dados retirados da bibliografia de (Miguel, 2006), tendo como resultado 4,5%. Para o parâmetro **I** foram utilizados dados retirados da bibliografia de Miguel 2006, sendo constituído por areia e cascalho. Por fim para o parâmetro **C** também foram retirados dados da mesma bibliografia tendo como resultado <4,1m/d.

Os resultados da multiplicação dos índices e pesos de cada parâmetro e o resultado da vulnerabilidade encontram-se apresentados na Tabela 8.

Tabela 9- Índice DRASTIC para a Área 1.

Área	Parâmetro	Classe	Índice	Peso	Índice Parcial	DRASTIC Total	Vulnerabilidade
1	D	9,1-15,2 m	1	5	5	128	Moderada
	R	178-254 mm	8	4	32		
	A	4 - 9	7	3	21		
	S	Areias	9	2	18		
	T	2 - 6	9	1	9		
	I	Areia e cascalho	8	5	40		
	C	<4,1 m/dia	1	3	3		

6.5- Vulnerabilidade à poluição – aplicação do Índice GOD

Para a análise da vulnerabilidade à poluição foi utilizada também a metodologia GOD, que é uma metodologia mais simplificada cuja principal vantagem é a facilidade de sua utilização e o facto de utilizar os parâmetros mais importantes, como profundidade do nível freático, litologias da zona vadosa e de camadas confinantes e condição do aquífero.

O sistema aquífero Quelo-Luanda é considerado como aquífero livre. Desta forma, para o parâmetro **G** foi atribuído o valor: 0,6. Para o parâmetro **O** foi considerado o valor: 0,7 correspondente as intercalações de areia, cascalhos, indicando assim um aquífero constituído litologicamente por depósitos de origem aluvial e fluvial, com baixo grau de fissuração e capacidade moderada de atenuação de poluentes. O parâmetro **D** foi considerado o valor: 0,6 com base na profundidade média dos níveis piezométricos.

Aplicando os mesmos valores a fórmula para o cálculo do índice de vulnerabilidade GOD obteve-se o valor: 0,42.

$$IG = 0,6 \times 0,7 \times 0,6 = 0,42$$

Na metodologia GOD a vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três parâmetros. O peso do índice de vulnerabilidade varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de zero (0), significa que o aquífero é menos vulnerável a contaminação e quanto mais próximo a um (1) mais vulnerável. A partir do resultado obtido é possível verificar que a área de estudo possui vulnerabilidade moderada, resultado este igual ao do índice DRASTIC.

6.6- Perímetro de proteção - aplicação do método do Raio Fixo Calculado

Para presente estudo utilizou-se o método do Raio Fixo Calculado, adaptado pelo Decreto-Lei nº 382/99, de 22 de Setembro (Legislação Portuguesa). Este, é um dos métodos de delimitação de perímetros de proteção que permite efetuar uma análise quantitativa, necessitando de dados mais gerais sobre as condições hidrogeológicas do aquífero, por este motivo foi o escolhido para o presente trabalho.

A escolha do método do Raio Fixo Calculado vem no seguimento de algumas características apresentadas por este método no ponto 4.3.2.2, que se consideram mais adequadas as respetivas áreas de estudo.

Com base neste critério, efetuou-se o cálculo das áreas de proteção das Zonas Intermédia e Alargada para cada uma das áreas de estudo de acordo com o tipo de sistema aquífero e o raio da Zona Imediata está fixado no quadro legislativo.

Para os parâmetros utilizados na aplicação desta metodologia foram atribuídos valores de acordo com bibliografias de referência e trabalhos desenvolvidos em áreas de estudo com características semelhante mas este facto não afeta o objetivo primordial deste estudo:

- O valor de caudal (Q) utilizado corresponde ao caudal encontrado nos dados obtidos pela empresa responsável pelo licenciamento das captações uma vez que não foi possível fazer ensaios de caudal.
- O valor da porosidade eficaz (n) tem como base o valor do anexo do Decreto-Lei nº 382/99 para as formações aquíferas em rochas não consolidadas e no caso de estudo areias.
- O valor da espessura saturada (H) que é correspondente ao valor medido na vertical entre a base da captação e o topo da superfície freática, com a inexistência da profundidade do tubo ralo, fez-se a diferença entre a profundidade e o nível estático observados nos dados adquiridos pela empresa de licenciamento das captações (Anexos I).
- O valor do tempo (t) corresponde ao número de dias que resulta do tempo necessário para um poluente percorrer o raio fixo, num meio com determinado coeficiente de permeabilidade, de acordo com o Decreto-Lei nº382/99.

A definição das zonas imediata, intermédia, alargada de acordo com a equação 4 resultam da aplicação dos dados representados na Tabela 9 e estão ilustradas nas Figuras 30, 31 e 32.

Tabela 10- Definição das Zonas Imediata, Intermédia e Alargada, segundo a equação 4.

Captação	Q (m ³ /d)	n (%)	H (m)	Zona Imediata r = (m)	Zona Intermédia r = (m)	Zona Alargada r = (m)
Poço 1	192	25	30	40	2,01	16,89
Poço 2	192	25	50	40	1,49	12,47
Poço 3	120	25	39	40	1,39	11,69
Poço 4	192	25	61	40	1,35	11,3

Tendo em conta o Decreto Lei nº 382/99, as captações em estudo, enquadram-se em sistemas aquíferos do Tipo 2, formações porosas, estabelece os seguintes critérios:

- Zona de Proteção Imediata: $r=40$ m (r é o raio da zona de proteção);
- Zona de Proteção Intermédia: r é o maior valor entre 60 m e (r para $t=50$ dias);
- Zona de Proteção Alargada: r é o maior valor entre 500 m e (r para $t=3500$ dias).

Obtendo desta forma a Tabela 10 representando os valores para as referidas áreas de estudo sendo a posterior ilustradas nas Figuras 31, 32 e 33.

Tabela 11- Definição das Zonas Imediata, Intermédia e Alargada.

Captação	Q (m ³ /d)	n (%)	H (m)	Zona Imediata r = (m)	Zona Intermédia r = (m)	Zona Alargada r = (m)
Poço 1	192	25	30	40	60	500
Poço 2	192	25	50	40	60	500
Poço 3	120	25	39	40	60	500
Polo 4	192	25	61	40	60	500



Figura 31- Perímetro de proteção nos poços 1 e 2.

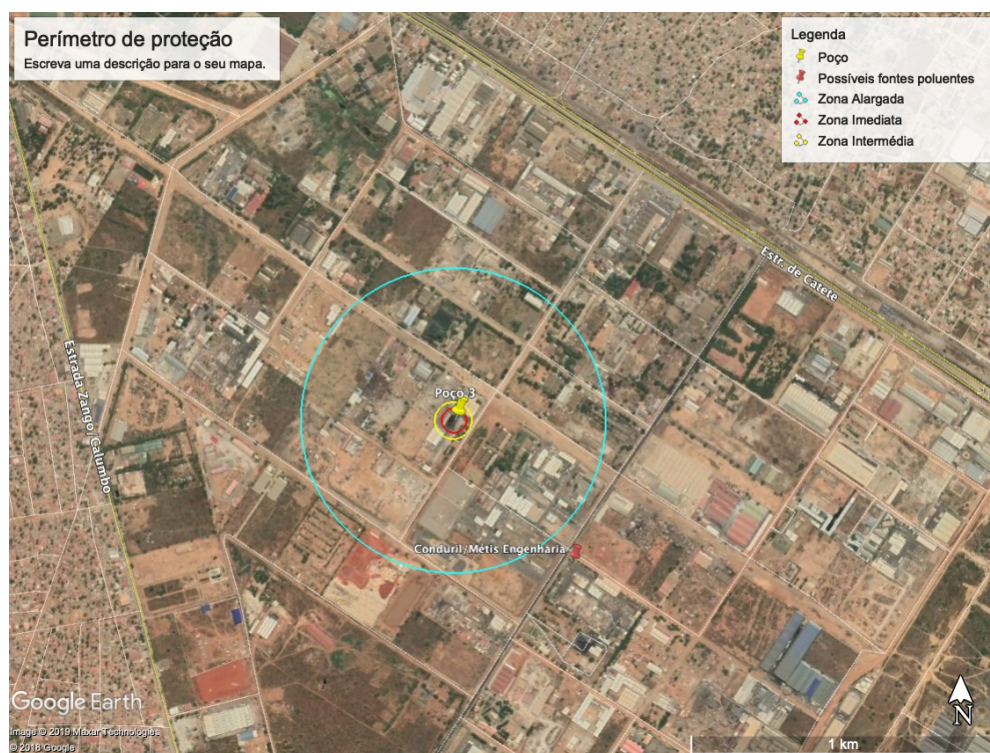


Figura 32- Perímetro de proteção no poço 3.

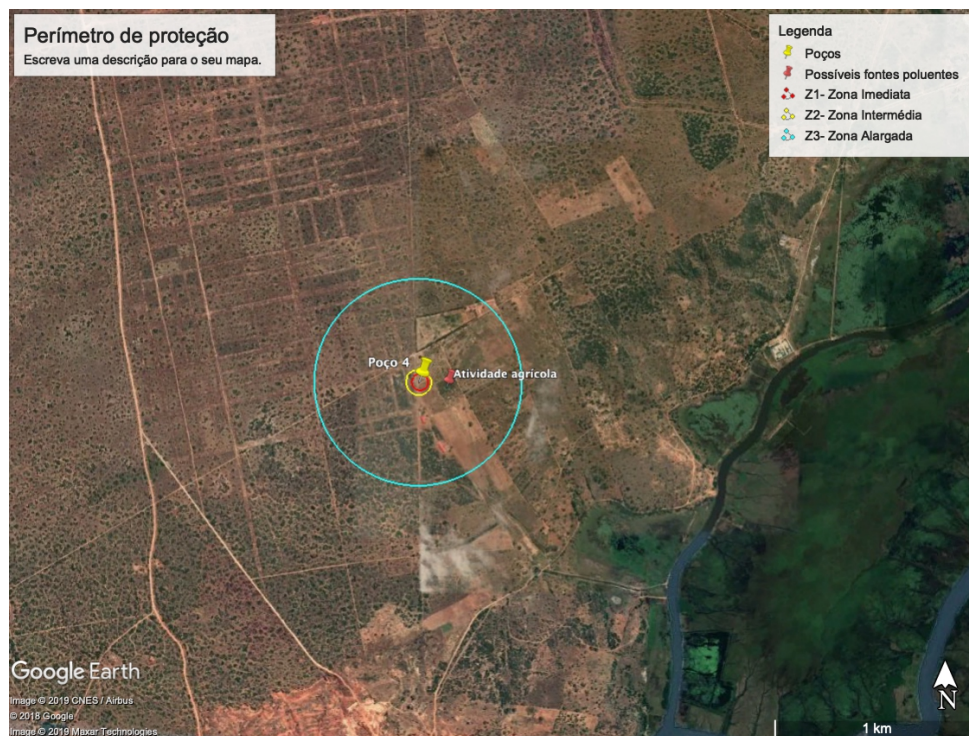


Figura 33- Perímetro de proteção no poço 4.

Durante o reconhecimento da área foram identificados algumas possíveis fontes de poluição, apontadas nas Figuras dos perímetros de proteção. Pode-se observar melhor algumas destas práticas em Anexos II. Estas práticas na maioria das vezes geram alterações na drenagem natural, os níveis freáticos, a paisagem e transportam consigo materiais contaminantes, tornando-se necessário prever, evitar ou atenuar tais efeitos com medidas apropriadas evitando que os poluentes de diversas origens atinjam as principais fontes de abastecimento de água.

Capítulo 7- Considerações Finais

Sendo as águas subterrâneas um recurso estratégico, que merece proteção contra agentes nocivos e ações prejudiciais, recomenda-se que se deve adotar estratégias que evitem a chegada de contaminantes aos aquíferos. Uma vez que a presença destas substâncias pode trazer consequências negativas em vários aspetos. Efeitos negativos para a saúde pública, particularmente nas condições sanitárias; efeitos negativos económicos, nomeadamente na conservação dos sistemas de abastecimento; efeitos negativos a nível social principalmente na aceitabilidade da água para os consumidores. Para facilitar todos estes aspetos foram criados padrões de potabilidade, sendo uma água potável quando satisfaça todos os padrões.

A definição de perímetros de proteção tem sido um método eficaz de efetuar a prevenção dos recursos hídricos, especialmente quando estes instrumentos são complementados pela implementação de monitorização e alerta para os diferentes níveis de proximidade das captações de acordo com o grau de risco associado. Partindo do princípio que determinada substância ou processo gerador de poluição não se encontra ainda dentro da zona a proteger, o sistema de monitorização e alerta deverá detetar com a antecedência mínima necessária o poluente, para que sejam tomadas as medidas necessárias para que estes não atinjam a captação, ou seja o sistema de alerta deverá ser acionado com a antecedência suficiente para evitar um problema de saúde pública.

Para o cálculo da vulnerabilidade do sistema aquífero devido a escassez de certos dados foram usados os índices GOD e DRASTIC sendo recomendável, futuramente, aplicar outros índices e suas respetivas cartografias usando Sistema de Informação Geográfica, nas fases para estabelecer comparações entre eles e ver o que melhor representa a área de estudo uma vez que a elaboração de mapas de vulnerabilidade constitui uma das etapas na qual as atividades de gestão e proteção da água subterrânea possam apoiar-se, orientando os profissionais quanto ao planeamento ambiental e territorial no que diz respeito a criação de estudos de monitorização dos riscos de contaminação e de qualidade das águas seguido de definições de áreas de proteção e controle de utilização das águas subterrâneas.

O método do Raio Fixo Calculado é um método simples e pouco dispendioso. No entanto, os resultados pouco precisos, por se tratar de um método que considera um número muito limitado de fatores, e que não leva em conta aspetos importantes como o gradiente hidráulico, limites de fluxo entre outros. Sobretudo este método pode representar mais valia numa fase inicial do estudo dos perímetros de proteção de captações de água subterrânea.

Angola não apresenta rede nacional de monitorização de águas subterrâneas, por esse motivo há uma lacuna de informações a respeito das águas subterrâneas que ficou evidenciado. Há pouca fonte de informação sobre esse tema desta forma os dados sobre as características do aquífero referido no trabalho também é escasso.

Considerando importante esta temática, recomenda-se como decorrência deste trabalho mais estudos e pesquisas como a identificação e análise de diversos usos e ocupação do solo nas áreas de influência das captações subterrâneas; que se proponha medidas administrativas de proteção das áreas de captações; que se proponha um sistema de monitorização de qualidade das águas subterrâneas.

Bibliografia

Aller, L.; Bennet, T. ; Lehr, J.H. e Petty, R.J. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035. Washington, D.C.

Anderson, J., Cartwright, J., Drysdall, S., Vivian, N. (2000). Controls on turbidite sand deposition during gravity-driven extension on a passive margin: examples from the Miocene sediments in block 4, Angola. *Marine Petroleum Geology*, 17, 1165 –1203.

Barbosa, L. 2007. Zoneamento de aquíferos através da delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público de água: o caso da cidade de João Pessoa. PB (Tese de Mestrado da Universidade Federal da Paraíba).

Bear, J. & Verruit, A. 1987. Modeling groundwater flow and pollution. Dorchester: D. Reidel, 144 p.

Brito, V. S. Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos no Município de Campo Formoso – Bahia. 2013. 60 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Curso de Geologia/Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA, 2013.

Brognon, G., Verrier, G. (1965). Tectonique et sedimentation dans le bassin du Cuanza (Angola). *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola – 1o Semestre*, 5-90.

Brownfield, M., Charpentier, R. (2006). Geology and Total Petroleum Systems of the West Central Coastal province (7203), West Africa. U.S Geological Survey Bulletin 2207-B.

Bryant, I., Dailly, P., Fainstein, R., Harvey, N., McCoss, A., Montarom, B., Quirk, D., Tapponier, P. (2012). Basin to Basin: Plate Tectonics in Exploration. *Oilfield review autumn*, 38-57.

Carmo, A. R. C. Recarga subterrânea direta e sua influência sobre a temperatura e a condutividade elétrica em microbacias do rio Vacacaí-Mirim-RS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. 2014. 132f.

Cazier, E., Bargas, C., Buambua, L., Cardoso, S., Ferreira, H., Inman K., Lopes, A., Nicholson, T., Christopher, O., Saller, A., Shinol, J. (2014). Petroleum geology of Cameia field, Deepwater

pre-salt Kwanza Basin, Angola, west Africa. Search and discovery article #20275.

Civita, M. (1990) – La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Proc. 1° Nat. Cong. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi, 3, Marano sul Panaro.

Custódio E and Llamas MR (1983) Hidrología subterrânea. Editorial Omega, Barcelona, Vol.1 e 2.

De Andrade, H.A.S, (1997). Studio della morfogenesi e delle tendenze morfoevolutive attuali nella fascia costiera angolana, Tese de Doutoramento.

Departamento de Recursos Minerais – DRM/RJ. Poços Tubulares e Outras Captações de Águas Subterrâneas. Orientação aos Usuários, 2003. Disponível em <www.drm.rj.gov.br>.

Diário da República, Decreto-Lei n.º 382/99, Perímetros de Proteção de Captações de Água Subterrânea, I Série-A, Nº 222 – 22-9-1999. Disponível em: <http://dre.tretas.org/dre/105920/>.

Diniz, A.C. (1973). Características mesológicas de Angola. p.155-164. Nova Lisboa, XII: p.64.

Diniz, A.C. & AGUIAR, F.Q.B. (1966). Geomorfologia, solos e ruralismo da região central angolana. Instituto de Investigação Agronómica de Angola, Nova Lisboa.

EPA.(1994). "Ground Water and Wellhead Protection: Handbook." United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Water, EPA/625/R-94/001.

EPA.(1987). "Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas." United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Ground-Water Protection, Washington, D.C.20460, PB88-111430.

Feitosa, F.A.C. & Filho, JM. 1997. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. Serviço Geológico do Brasil – SPRM. Fortaleza, Ceará.

Feitosa, F.A.C. & Filho, JM. 2000. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 2a ed. CPRM. 269 p.

Feitosa ACF, Filho JM, Feitosa EC, Demetrio JGA (2008) Hidrogeologia – conceitos e aplicações, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Laboratório de Hidrogeologia (LABHID).

Fetter, C.W., (2001) Applied Hydrogeology (4th ed.), Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 598p.

Fitts, C.R. (2002) Groundwater Science. Academic Press.

Foster, S. 1987. *Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy*. Proc. Intl. Conf. Vulnerability of soil and groundwater to pollution Nordwijk, The Netherlands, p. 69-86.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., Paris, M., 2002. Groundwater: quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. First edition The World Bank, Washington D.C.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2006). Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington D.C.

Freire, C. C.; Omena, S. P. F. Princípios de Hidrologia Ambiental. UFSC/UFAL. 2005. FUH, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land surface. Sci. Atmos. Sin. 5, 23–31 (in Chinese with English abstract).

Gogu, R. C., Dessargues, A. (1999). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology 39 (6) April 2000.

Guiraud, M., Buta-Neto, A., Quesne, D. (2010). Segmentation and differential post-rif uplift at the Angola margin as recorded by the transform-rifted Benguela and oblique-to-orthogonal-rifted Kwanza basins. Marine and Petroleum Geology 27, 1040 – 1068.

Hudec M.R., Jackson M.P.A. (2005). The great West African Tertiary coastal uplift: Fact or fiction? A perspective from the Angolan divergent Margin. Tectonics 24, TC6014.

Huneau, F., Jaunat, J., Kavouri, K., Plagnes, V., Rey, F., Dörfli, N. (2013). Intrinsic vulnerability mapping for small mountainous karst aquifers, implementation of the new PaPRIKa method to Western Pyrenees (France). Engineering Geology 161 (2013) 81-93. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.028>.

IGM.(2001). “Água Subterrânea: Conhecer para proteger e preservar”.

IGM. (2001). “Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas”.

ITGE. (1991). “Guia Metodologica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas.” Instituto Tecnológico GeoMinero de Espanã, Madrid.

Krijgsman, B.; Lobo-Ferreira, J.P. (2001) - *A Methodology for Delineating Wellhead Protection Areas*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Informação Científica de Hidráulica INCH 7, Nov.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009. Metodologias para um melhor planeamento e gestão do uso do solo agrícola atendendo à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição difusa. Ministério das Obras Publicas, Transportes e Comunicações, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Aguas Subterrâneas. Proc. 0607/14/15799, Lisboa.

Lapão, L., Pereira, E. (1971). Carta Geológica. Folha no 206-Egito praia 1:100.000. Notícia explicativa. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas. Luanda.

Laureano, Z. 2012. Metodologia para delimitar perímetros de proteção de captações de água subterrânea (Tese de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa).

Lobo Ferreira, J.P, Cabral, M. (1991). “Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community’s Atlas of Groundwater Resources.” Meeting of the European Institute for Water, Grounwater Work Group Brussels.

Lobo Ferreira, J. P., Leitão, T. E., Oliveira, M. M., Rocha J. S., Barbosa, A. E. (2009). Protecção das Origens Superficiais e Subterrâneas nos Sistemas de Abastecimento de Água. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Regulador de Águas e Resíduos.

Lobo Ferreira, J.P., Teresa E. Leitão, Manuel M. Oliveira, João Soromenho Rocha, Ana Estela Barbosa. (2009). Protecção das origens superficiais e subterrâneas nos sistemas de abastecimento de água. Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Meaulo, F. J. Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP). 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

Mendes, E. (2010). “Modelos GeoHidráulicos em meios fracturados de rochas graníticas – Caso de Estudo do Aquífero da Fonte da Fraga – Serra da Gardunha” Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Mierzwa, F.A poluição das águas.

<http://www.phd.poli.usp.br/phd/grad/phd2218/materialOMeioAquaticoll.pdf>

Miguel, G. L. Rebollo & L.F. Martín-Loeches, M. (2005). Avaliação preliminar da recarga e da reserva do sistema aquífero Quelo-Luanda (Angola).

Miguel, G. L. (2006). *Caracterización Hidrogeológica y Ambiental de Luanda y sus Alrededores.* Tese de Doutoramento, Universidade De Alcalá, Espanha.

Miguel, G. L. Rebollo & Martin – Loeches, M. (2006). Hidrogeologia do sistema Aquífero Quelo – Luanda (Angola). VII Congresso Nacional de Geologia de Portugal. Estremoz.

Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. MMA – SRHU. Águas Subterrâneas, um recurso conhecido a ser protegido. Brasília, 2007. 38p.

Mohriak, W. (2014). Birth and Development of Continental Margins Basins Analogues from the South Atlantic, North Atlantic and the Red Sea. Search and Discovery. Article # 41502.

Moinante, M.J. de A. (2003) Delimitação de Perímetros de Proteção de Captações de Águas Subterrâneas Estudo Comparativo Utilizando Métodos Analíticos e Numéricos. Tese de Mestrado apresentada à Universidade Técnica de Lisboa, com parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Georrecursos Lisboa/Portugal.

Moinante M., Cárcamo, J, Ferreira .(2004). “Delimitação de Perímetros de Protecção de captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público do concelho de Montemor-o-novo”. In: CABRAL, J, FERREIRA, J, MONTENEGRO, S, COSTA, W. (2004) “Água subterrânea. Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento” Recife: ED Universitária da UFPE.pp.323,326.

Nascimento, L. M. do (2013). Mapeamento da Vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação no Município de Boa Vista do Cadeado/RS. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, Brasil.

Nobre, R. 2006. Avaliação de risco para o uso e proteção de aquíferos. Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió-AL (Tese de Doutoramento da Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Palauque, L. Angola um país fabuloso. 1ª edição Ed. Internacionais Lda. p. 12-13. 1995.

Pavão, A. D. M. Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria – RS. 2004. 112 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria/ UFSM, Santa Maria, 2004.

Pereira, Maria (2011). Hidrogeoquímica do sistema aquífero Quelo-Luanda (Tese de Mestrado da Universidade Agostinho Neto.

Poluição. 2003. Disponível em: < <http://152.92.176.67/Aula20.pdf> >. Acesso em: 11/05/2003.

Prada, S., Mendonça, J., Silva, M. O., Gaspar, A., Figueira, C., Pontes, A. (2008). Definição dos perímetros de Proteção das Galerias de Captação do Maciço do Paul da Serra, Ilha da Madeira.

Quesne, D., Buta-Neto, A., Benard, D., Guiraud, M. (2009) Distribution of Albian clastic deposits in the Benguela basin (Angola): evidence of a Benguela paleocurrent. Bulletin de la Société Française. Fr, n. 2.

Ribeiro, D. M.; Rocha, W. F.; Garcia, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. Águas Subterrâneas, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.

Romeiro, C. I.da.R. A Tecnologia SIG Aplicada ao Estudo da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistema de Informação Geográfica). Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informações da Universidade Nova de Lisboa, 2012.

Segundo, J., Duarte, L.V., Callapez, P. (2014). Litostratigrafia da sucessão margo calcária da Formação de Quissonde (Albiano) do setor Ponta do Jomba- Praia do Binge (Bacia de Benguela, Angola). Comunicações Geológicas 101. Especial I, 567 - 571.

Sicato A., Chico A., Mateus D. & Roque V., 2007. Integração de métodos geológicos, hidrogeológico, topográfico e geofísicos para a determinação da origem e causas da elevação dos níveis das águas subterrâneas no Rangel – Trabalho de fim de curso de Licenciatura, DEI Geologia, Faculdade de Ciências (UAN).

Sonangol-Total., 1987. Carte geologique du bassin du Kwanza, Angola. Echelle 1:250.000. Synthèse basée sur des missions de terrain, effectuées entre 1968 et 1972 par TOTAL et C.A.P.

TEP/DE/DIR-CONS, Outubro 1987, No 58.

Sophocleous, M. A. Groundwater recharge. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Kansas, Lawrence, USA. 2004. 41 p.

Sousa, M. 2011. Delimitação de Perímetros de Proteção para as captações das Eirinhas- Distrito do Castelo Branco (Tese de Mestrado do Instituto Politécnico de Castelo Branco).

Stark, D. (1991). Geologia Petrolífera. Well Evaluation Conference. Schumberger 99.

Todd, D.K. (1980). "Groundwater hydrology" John Wiley & Sons, New York, p.535.

Tucci, Carlos E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2001.

Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L., 1992. *AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada*. PPWD Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.

Vogel, Mercia Maria. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Cultural da Quarta Colónia de Emigração Italiana, RS. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de ciências naturais e exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Santa Maria, RS, Brasil, 2008.

Vrba, J. & Zaporec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise, v.16. 131p.

-

APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos


Great Oliver Groundwater Vulnerability. (2011). "Método Drastic". Disponível na WWW: <http://frakturmedia.net/oswp/drastic/>.


INAG – Instituto da Água - Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Lisboa, Instituto da Água, Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Divisão de Recursos Subterrâneos, 1997. INAG - <http://intersigweb.inag.pt/InterSIG/>, 2000.

Anexos

Anexo I

Litologia dos três poços

Sociedade de Construções SEMENTE VIVA								
Local: Farol das Lagostas		FURO 1				Data Execução:		
Bairro: Bairro Uíge		Sonda: N/A				Início: Ano de 1990		
Distrito: Ngola Kiluanje		Sondador: SEMENTE VIVA				Fim: Ano de 1990		
Província: Luanda		Supervisor: N/A						
Descrição	Corte	Profundidade (m) Diâmetro(mm)	Nível Est.(m)/ Din.(m)	Caudal (m³/h)	Avanço (m/h)	Descrição Geológica	Profundidade (m)	Simbologia
		110/160	80/90	8		Solo areias vermelhas	0.00	
						Areias finas	20.00	
						Argila cinza clara	35.00	
						Areia grossa	50.00	
						Argila cinza	70.00	
						Areia grossa Lavada	85.00	
						Areia grossa Lavada	90.00	
						Argila preta	95.00	
						Argila preta	100.00	
							110.00	

SEMENTE VIVA, LDA								
Local: Zona Industrial Viana						Data Execução:		
Comuna: Viana		Sonda: Iveco Oxidril 100				Início: 27/06/2004		
Município: Viana		Latitude: 09° 09.906'		Sondador: BESAF		Fim: 27/07/2004		
Província: Luanda		Longitude: 13° 34.850'		Supervisor: BESAF				
Descrição	Corte	Profundidade (m) / Diâmetro(mm)	Nível Est.(m)/ Din.(m)	Caudal (m³/h)	Avanço (m/h)	Descrição Geológica	Profund. (m)	Simbologia
		156/310	117/150	5		Solo areias vermelhas	0.00	
						Areias finas	20.00	
						Argila cinza clara	40.00	
						Areia grossa	60.00	
						Argila cinza	90.00	
						Areia grossa Lavada	112.00	
						Areia grossa Lavada	140.00	
						Argila preta	156.00	

Anexos II

Fonte de poluição (vala)



Fonte de poluição Fábricas abandonadas



Fonte de poluição Bombas de combustível

